



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ  
ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ

ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΣΕΡΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ

ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

& ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ



**ΔΙ-ΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

Κωνσταντίνος Κωνσταντινίδης

Ηλεκτρονικός Μηχανικός ΤΕ

**Κίνδυνοι και επιπτώσεις στην Αεροναυτιλία και τα Αεροδρόμια από τη  
διασπορά και εναπόθεση ηφαιστειακής τέφρας**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Λέκκας Ε.  
Κυριακόπουλος Κ.  
Νάστος Π.

Καθηγητής (Επιβλέπων)  
Καθηγητής  
Αν. Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2012**

## Περίληψη

Οι κίνδυνοι στην αεροναυτιλία και στα αεροδρόμια από τη διασπορά και την εναπόθεση ηφαιστειακής τέφρας περιγράφονται στην παρούσα διατριβή. Τα ηφαίστεια και ειδικότερα οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι οι πηγές των νεφών ηφαιστειακής τέφρας που εξαπλώνονται αναλόγως των μετεωρολογικών συνθηκών και αποτελούν κίνδυνο για την εναέρια κυκλοφορία. Τα σωματίδια ηφαιστειακής τέφρας (ηφαιστειακή στάχτη και σκόνη) μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στα αεροσκάφη εν πτήση ή εν στάση και για το λόγο αυτό ο International Civil Aviation Organisation (ICAO) έχει υιοθετήσει στρατηγική παύσης των πτήσεων σε περιοχές που η συγκέντρωση τέφρας δεν είναι μηδενική και διακοπή λειτουργίας των αεροδρομίων. Στη διατριβή προτείνονται τρόποι βελτίωσης των προβλέψεων, των μετρήσεων, των διαδικασιών αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων, του συστήματος International Airways Volcano Watch (IAVW) και των μοντέλων που χρησιμοποιούν τα εννέα Volcanic Ash Advisory Center (VAAC) ανά τον κόσμο για την αναγνώριση του ηφαιστειακού νέφους και την πρόβλεψη της κίνησής του. Η διατριβή μελετά την ηφαιστειακή δραστηριότητα τόσο από τη γεωλογική σκοπιά όσο και υπό το πρίσμα των κινδύνων που εγκυμονεί για την αεροναυτιλία. Αναλύονται τα μοντέλα Volcanic Ash Transport and Dispersal Model (VATDM) και τα οι άξονες βελτίωσής τους, καθώς και οι τεχνικές μετρήσεων και συνέγερσης πραγματικού χρόνου μέσα από δορυφορικά, επίγεια και εναέρια μέσα. Συμπληρωματικά προτείνεται η εκπόνηση μελετών για τον καθορισμό ορίων ασφαλούς έκθεσης αεροσκαφών σε ηφαιστειακή τέφρα, σχέδιο βελτιστοποίησης των δικτύων μέτρησης των ηφαιστειακών νεφών και γενικότερα αναδεικνύονται τα πεδία συνεργασίας για την επίλυση του προβλήματος από τις εμπλεκόμενες επιστημονικές κοινότητες. Αναπτύσσονται επίσης οι σύγχρονες μέθοδοι και διαδικασίες πλοήγησης ακριβείας, η τεχνολογική τους βάση και η επιχειρησιακή τους χρησιμότητα. Παρουσιάζεται το ηφαίστειο του Eyjafjallajökul ως ιδιαίτερη περίπτωση που ανέδειξε γενικά προβλήματα στη διαχείριση αντιστοίχων κρίσεων και προτείνονται λύσεις εξ' αφορμής των ελλειμμάτων που διαπιστώθηκαν, ώστε να αποφευχθούν αντίστοιχες οικονομικές επιπτώσεις στο μέλλον.

## Abstract

Risks in air navigation and airports due to tephra transport and dispersal are examined in the thesis. Volcanic eruptions are the sources of ash clouds that are moving because of the winds and generally the meteorological conditions, creating a potential risk for air navigation. The particles of volcanic tephra (volcanic ash and dust) may damage airplanes severely, while they are parked in the airports, as well as while they are flying within ash clouds. International Civil Aviation Organization (ICAO) has adopted a of zero tolerance strategy to tephra clouds and thus recommends the cancelation of any flight that might encounter volcanic tephra cloud of any concentration in particles other than zero and the closure of airports affected by tephra deposition. Several ways are proposed in order to amend the prediction of ash transport and dispersal, the measuring techniques and the measurements, the procedures to overcome the impacts of the eruption, the cooperation within the International Airways Volcano Watch (IAVW) system and particularly the results of the models that are used by the Volcanic Ash Advisory Centers (VAAC) for the detection of the volcanic ash cloud and the prediction of its evolution in time and air space. Volcanic eruption is examined in the thesis with respect to its geological aspects and the risks that causes to air navigation. Analysis of Volcanic Ash Transport and Dispersal Models (VATDM) are presented, alongside with guidelines for their amendment and new ideas for real time measurements and observation techniques with satellite, ground, and air systems. Strategy is proposed for setting the limits for safe flight through clouds of tephra based on manufacturers evaluation, for the optimization of the observing and measuring networks of tephra clouds and for the collaboration of the involved scientific communities to confront with the problems in a unified way. The possibilities and current trends for modern air navigation with precision based procedures are presented, by focusing on the technological principles of systems and their operational use. The volcanic eruption of Eyjafjallajökull in 2010 is examined, as a special occasion that revealed the general problems in crisis management of the volcanic impacts on air navigation. Solutions to bridge the identified management gaps are proposed, in order to avoid similar economical impacts in the future.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών και ειδικότερα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν συνδράμοντας ο καθένας με το δικό του τρόπο στο τελικό αποτέλεσμα.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής καθηγητή Ε. Λέκκα για τη βοήθεια και την πολύτιμη συμβολή του στη διαμόρφωση της εργασίας, αλλά και τον καθηγητή Δ. Παπανικολάου, ο οποίος ως διευθυντής του μεταπτυχιακού προγράμματος με καθοδήγησε από τα πρώτα βήματα της φοίτησής μου και με ενέπνευσε με τη διδασκαλία του.

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος κ. Π. Νάστο, κ. Κ. Κυριακόπουλο, κ. Χ. Σίδερη και κ. Ι. Παπανικολάου για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν στο ερευνητικό τους πεδίο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και τις δημιουργικές συζητήσεις που αποτέλεσαν αφορμή για νέες ιδέες.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον κ. Μ. Διακάκη για το σχολιασμό των εργασιών και κυρίως της διατριβής μου. Η αρωγή του στην οργάνωση και επιμέλεια των κειμένων ήταν καθοριστική.

Τους συναδέλφους και φίλους μου Μ. Κάρδαρη, Β. Κορφιάτη, Ε. Μιχαηλίδη, Π. Κυριαζή και Α. Τσιώκο, ευχαριστώ για τη βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την εκπόνηση της διατριβής με τις γνώσεις τους επί ειδικών θεμάτων και τις συμβουλές τους.

Η βοήθεια που προσέφεραν οι συμφοιτητές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Γιώργος Δεληγιαννάκης, Λεωνίδα Φωτάκος, Βασίλης Βαρθακογιάννης, Γιάννης Δελακουρίδης, Εβελίνα Κώτση, Κατερίνα Κατετσιάδου και Παλληκαράκης Άγγελος ήταν ανεκτίμητη. Πάντα έβρισκαν τρόπο να με κεντρίζουν με τις παρατηρήσεις τους και να με εμπυχώνουν σε όλα τα στάδια της φοίτησής μου, η ευγενής άμιλλα που αναπτύξαμε ήταν καταλύτης στην πρόοδό μου.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ αξίζει στη σύζυγο και την κόρη μου, που ήταν δίπλα μου και με στήριζαν σε όλο αυτό το εκπαιδευτικό μου ταξίδι. Η παρούσα διατριβή δικαιοματικά αφιερώνεται σε αυτές.

Κων/νος Κωνσταντινίδης

Αθήνα, Ιούλιος 2012

## Πίνακας Περιεχομένων

|   |    |
|---|----|
| Περίληψη .....                                    | 2  |
| Abstract.....                                     | 3  |
| Ευχαριστίες.....                                  | 4  |
| Πίνακες .....                                     | 8  |
| Εικόνες.....                                      | 9  |
| Συνοτομογραφίες .....                             | 11 |
| 1 Εισαγωγή.....                                   | 12 |
| 1.1 Ερευνητικό αντικείμενο.....                   | 12 |
| 1.2 Σκοπός της διατριβής.....                     | 12 |
| 1.3 Δομή της διατριβής.....                       | 13 |
| 2 Ηφαίστεια.....                                  | 15 |
| 2.1 Τι είναι Ηφαίστειο .....                      | 15 |
| 2.2 Δημιουργία ηφαιστείων – σημεία ανάπτυξης..... | 15 |
| 2.3 Κύριοι τύποι ηφαιστείων .....                 | 17 |
| 2.3.1 Βασαλτικά υψίπεδα (Plateaux) .....          | 18 |
| 2.3.2 Ασπιδόμορφα ηφαίστεια.....                  | 19 |
| 2.3.3 Κώνος σκωριών (Cinder cone) .....           | 20 |
| 2.3.4 Στρωματοηφαίστεια ή μεικτά ηφαίστεια .....  | 21 |
| 2.3.5 Ηφαιστειακοί Θόλοι.....                     | 23 |
| 2.3.6 Καλδέρες.....                               | 24 |
| 2.4 Δευτερεύουσες ηφαιστειακές δομές .....        | 25 |
| 2.4.1 Ηφαίστεια αερίων .....                      | 25 |
| 2.4.2 Διάτρημα (Diatrema) .....                   | 25 |
| 2.4.3 Μαάρ (Maar).....                            | 25 |
| 3 Δράση Ηφαιστείου.....                           | 26 |
| 3.1 Ηφαιστειακές εκρήξεις .....                   | 26 |
| 3.1.1 Μαγματικές εκρήξεις.....                    | 26 |
| 3.1.1.1 Εκρήξεις τύπου Hawaiian .....             | 26 |
| 3.1.1.2 Εκρήξεις τύπου Strombolian.....           | 27 |
| 3.1.1.3 Εκρήξεις τύπου Vulcanian.....             | 28 |
| 3.1.1.4 Εκρήξεις τύπου Peleean.....               | 29 |
| 3.1.1.5 Εκρήξεις τύπου Plinian .....              | 31 |
| 3.1.2 Υδροηφαιστειακές εκρήξεις.....              | 33 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.1.3   | Δείκτης εκρηκτικότητας VEI.....                                       | 33 |
| 3.2     | Προϊόντα ηφαιστειακών εκρήξεων.....                                   | 35 |
| 3.2.1   | Ηφαιστειακά αέρια.....  | 35 |
| 3.2.2   | Τέφρα.....  | 36 |
| 3.3     | Επιπτώσεις ηφαιστειακών εκρήξεων.....                                 | 37 |
| 4       | Αεροπορία και Αεροναυτιλία.....                                       | 39 |
| 4.1     | Εξέλιξη της αεροπορίας.....   | 39 |
| 4.1.1   | Μηχανές πτήσης, ανεμόπτερα, χαρταετοί και αερόστατα.....              | 39 |
| 4.1.2   | Μηχανές με έλεγχο και προώθηση.....                                   | 40 |
| 4.1.3   | Οι αδερφοί Wright στην εποχή των καινοτομιών.....                     | 40 |
| 4.1.4   | Η Αεροπορία προ και κατά τη διάρκεια των Παγκοσμίων Πολέμων.....      | 41 |
| 4.1.5   | Η μεταπολεμική ανάπτυξη της Πολιτικής Αεροπορίας.....                 | 41 |
| 4.2     | Αεροπορικές έννοιες.....  | 42 |
| 4.3     | Σύγχρονη πλοήγηση ακριβείας.....                                      | 43 |
| 4.3.1   | Συστήματα GPS και GNSS.....   | 44 |
| 4.3.1.1 | Γενικά χαρακτηριστικά και αρχές λειτουργίας.....                      | 44 |
| 4.3.1.2 | Πλεονεκτήματα δορυφορικής πλοήγησης και πλοήγησης ακριβείας.....      | 46 |
| 4.4     | Αεροπορικοί κίνδυνοι (Hazards).....                                   | 48 |
| 5       | Ηφαιστειογενείς κίνδυνοι στην Αεροπορία.....                          | 50 |
| 5.1     | Ηφαιστειακή στάχτη και ηφαιστειακή σκόνη (volcanic ash and dust)..... | 51 |
| 5.2     | Μέθοδος εντοπισμού της ηφαιστειακής στάχτης και σκόνης.....           | 54 |
| 5.2.1   | Σύγχρονα συστήματα και τεχνικές ανίχνευσης τέφρας.....                | 56 |
| 5.3     | Κίνδυνοι στα αεροδρόμια.....  | 58 |
| 5.3.1   | Είδη των ηφαιστειακών κινδύνων στα αεροδρόμια.....                    | 58 |
| 5.3.1.1 | Πάγιες διαδικασίες διευθετήσεων πριν την έκρηξη.....                  | 62 |
| 5.3.1.2 | Διαδικασίες κατά τη διάρκεια της έκρηξης.....                         | 62 |
| 5.4     | Κίνδυνοι στα αεροπλάνα.....   | 64 |
| 5.4.1   | Γενικά.....   | 64 |
| 5.4.2   | Επιπτώσεις στους κινητήρες.....                                       | 65 |
| 5.4.3   | Επιπτώσεις στο σκάφος και στα συστήματα πλοήγησης.....                | 67 |
| 5.4.4   | Στοιχεία έκθεσης αεροσκαφών σε νέφη ηφαιστειακής τέφρας.....          | 68 |
| 5.5     | Το σύστημα International Airways Volcano Watch.....                   | 70 |
| 5.5.1   | Σκοπός και κατεύθυνση του IAVW.....                                   | 70 |
| 5.5.2   | Η Δομή του IAVW.....  | 70 |
| 5.5.3   | Τμήμα παρατηρήσεων του IAVW.....                                      | 71 |
| 5.5.3.1 | Παρατηρήσεις από σταθμούς εδάφους.....                                | 71 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.5.3.2 | Παρατηρήσεις από διερχόμενα αεροσκάφη.....                             | 72  |
| 5.5.3.3 | Δορυφορικές παρατηρήσεις.....  | 72  |
| 5.5.4   | Τμήμα παροχής – διακίνησης προειδοποιήσεων και συμβουλών του IAVW .... | 73  |
| 5.5.4.1 | Υπηρεσίες Ελέγχου Περιοχής και Πληροφοριών Πτήσης (ACC/FIC).....       | 73  |
| 5.5.4.2 | Μετεωρολογικές Υπηρεσίες (MWO) .....                                   | 74  |
| 5.6     | Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας (VAAC).....                   | 75  |
| 5.7     | Μοντέλα διασποράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας.....              | 77  |
| 5.7.1   | Περιγραφή δημοφιλέστερων μοντέλων VATDM.....                           | 77  |
| 5.7.1.1 | Μοντέλο NAME .....   | 77  |
| 5.7.1.2 | Μοντέλο MOCAGE – accident .....  | 78  |
| 5.7.1.3 | Λοιπά μοντέλα VATDM.....   | 78  |
| 5.7.2   | Οδικός Χάρτης βελτίωσης των μοντέλων VATDM.....                        | 79  |
| 5.7.2.1 | Μοντελοποίηση της διασποράς ηφαιστειακής τέφρας .....                  | 80  |
| 5.7.2.2 | Μείωση των στοιχείων ασάφειας και της επίδρασής τους .....             | 80  |
| 5.7.2.3 | Συνδυασμός μοντέλων πρόβλεψης και παρατηρήσεων .....                   | 81  |
| 6       | Η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull στις 14 Απριλίου 2010 .....   | 83  |
| 6.1     | Συνοπτικό Ιστορικό.....  | 83  |
| 6.2     | Γενική επισκόπηση της έκτασης της κρίσης.....                          | 85  |
| 6.3     | Ανάλυση της εξέλιξης του φαινομένου .....                              | 87  |
| 6.3.1   | Μετεωρολογικά στοιχεία .....   | 89  |
| 6.3.2   | Χρονική αποτύπωση του ηφαιστειακού νέφους .....                        | 90  |
| 6.3.3   | Αποτελέσματα προγνώσεων .....  | 92  |
| 6.3.4   | Μελέτες προ και μετά την έκρηξη του Eyjafjallajökull.....              | 94  |
| 6.4     | Επιπτώσεις στην Αεροναυτιλία της Ευρώπης .....                         | 96  |
| 6.4.1   | Καθυστερήσεις – ακυρώσεις.....   | 97  |
| 6.4.2   | Οικονομικά στοιχεία .....  | 99  |
| 6.5     | Ηφαιστεια που απειλούν την αεροναυτιλία στην Ευρώπη .....              | 100 |
| 7       | Συμπεράσματα .....   | 104 |
| 8       | Βιβλιογραφία .....   | 107 |

## Πίνακες

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 1. Δείκτης VEI, κατηγοριοποίησης και χαρακτηρισμού των ηφαιστειακών εκρήξεων.....   | 34 |
| Πίνακας 2. Σύσταση αερίων των ηφαιστειακών εκρήξεων. (Camp, 2006).....  | 35 |
| Πίνακας 3. Ηφαιστειακά προϊόντα και επιπτώσεις στο αεροπορικό έργο (Berbente, 2011). ....   | 50 |
| Πίνακας 4. Σύνθεση των σωματιδίων τέφρας που βρέθηκαν στα ηφαιστειακά νέφη τέφρας από εκρήξεις τεσσάρων ηφαιστειών. (Prata I.J, 1994). .... | 51 |
| Πίνακας 5. Συνέπειες της καθίζησης σωματιδίων, ύψος στήλης εκρήξεως 10 km, οριζόντιος άνεμος 50kts (Berbente, 2011).....                    | 52 |
| Πίνακας 6. Μοντέλα VATDM (μεταφοράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας). ....   | 79 |
| Πίνακας 7. Μοντέλα VATDM και συγκριτική τους θεώρηση (Bonadonna, Folch, Loughlin, & Puempel, 2011). ....                                    | 82 |
| Πίνακας 8. Χρωματικός κώδικας για την αεροπορία, όπως αποτυπώνεται από τα USGS παρατηρητήρια ηφαιστειακής δραστηριότητας .....              | 93 |
| Πίνακας 9. Προοδευτική αναδιαμόρφωση των κανόνων ασφάλειας πτήσεων στον εναέριο χώρο της Μεγάλης Βρετανίας.....                             | 97 |



## Εικόνες

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 1. Ηφαίστειο Nyiragongo στη δυτική ακτή του Κονγκό (WordlessTech-Robert Harding).....   | 15 |
| Εικόνα 2. Παγκόσμια κατανομή των ηφαιστειακών κέντρων ( <a href="http://terra.rice.edu/plateboundary">http://terra.rice.edu/plateboundary</a> ).....   | 16 |
| Εικόνα 3. Η περί-ειρηνική ζώνη (USGS).....   | 16 |
| Εικόνα 4. Σχηματική παράσταση “Hot Spot” (WHOI -Jayne Doucette) .....  | 17 |
| Εικόνα 5: Τύποι ηφαιστειών σύμφωνα με το USGS.....   | 18 |
| Εικόνα 6: Το Chasm Provincial Park στο Chilcotin Plateau Basalts στον Καναδά. ....   | 19 |
| Εικόνα 7. α) Ασπιδόμορφο ηφαίστειο (Department of Geography, Hunter College, City University of New York), β) Το ασπιδόμορφο ηφαίστειο Όλυμπος στον Άρη ( <a href="http://www.olympusmons.com">http://www.olympusmons.com</a> ). ....  | 19 |
| Εικόνα 8. Ηφαίστειο τύπου κώνου σκωριών (USGS, J.P. Lockwood, 1975).....   | 20 |
| Εικόνα 9. Το ηφαίστειο τύπου κώνου σκωριών Stromboli (USGS, B. Chouet, 1992). ....   | 21 |
| Εικόνα 10. Εγκάρσια τομή στρωματοηφαιστείου.....   | 22 |
| Εικόνα 11. α) Το στρωματοηφαίστειο Mt Mayon στις Φιλιππίνες, β) Το στρωματοηφαίστειο Fuji στην Ιαπωνία.....  | 22 |
| Εικόνα 12. Ηφαιστειακοί θόλοι στο βασαλτικό πλατό στην δυτική Σαουδική Αραβία. (Vic Camp). ....  | 23 |
| Εικόνα 13: α) Το Anak Kelud στην Ινδονησία 6 Δεκ. 2007 (CVGHM, Indonesia), β) Το "Anak Kelud στην Ινδονησία 26.1.2008. Το στόμιο εισόδου της σήραγγας αποστράγγισης που προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του όγκου των υδάτων της λίμνης καλύπτεται τώρα από το θόλο λάβας (CVGHM, Indonesia). .... | 23 |
| Εικόνα 14. Η καλδέρα της Σαντορίνης. ....  | 24 |
| Εικόνα 15. Καλδέρα του ασπιδωτού ηφαιστείου Kilauea.....   | 24 |
| Εικόνα 16. Σχηματική αναπαράσταση της φάσης διάτρημα.....  | 25 |
| Εικόνα 17. α) Στις 30 Δεκεμβρίου 1969, ένα σιντριβάνι λάβας πάνω από 300 μέτρα από την έκρηξη του ηφαιστείου Mauna Ulu. (USGS, Don Swanson) β) Κοντινή θέα σχοινώδους υφής λάβας που σχηματίστηκε στο ηφαίστειο Kilauea, Χαβάη. (T.N. Mattox, 11.06.1995) .....  | 27 |
| Εικόνα 18. Έκρηξη του ηφαιστείου Stromboli. ....   | 27 |
| Εικόνα 19. Vulcanian έκρηξη του ηφαιστείου Tunuvur μέρος της Rabaul Caldera. Papua New Guinea. (Flickr).....   | 28 |
| Εικόνα 20. Η ανδεσιτικής σύστασης λάβα με την μορφή “Βελόνας ή οβελίσκου” που ανυψώθηκε μετά την τρομακτική έκρηξη του ηφαιστείου Πελέ τον Μάιο του 1902. ....   | 29 |
| Εικόνα 21. Μηχανισμοί εκρήξεως τύπου Πελέ και τύπου Plinian.....   | 30 |
| Εικόνα 22. Μια δραματοποιημένη φωτογραφία από την τελευταία μέρα της Pompeii. ....   | 31 |
| Εικόνα 23. Plinian έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991. (Clucas R).....   | 32 |
| Εικόνα 24. Η δημιουργία του νησιού Surstey το 1963 από υδροηφαιστειακή έκρηξη ( <a href="http://www.ngdc.noaa.gov">http://www.ngdc.noaa.gov</a> NOAA).....   | 33 |
| Εικόνα 25. Διάγραμμα που δείχνει το μέγεθος της συσχέτισης του δείκτη VEI με τον συνολικό εκτινασσόμενο όγκο. ....   | 34 |
| Εικόνα 26. α) Διαστάσεις και μορφές τέφρας, β) Δείγμα τέφρας από την έκρηξη του ηφαιστείου Mount St. Helens 18.5.1980 (USGS, D. Wierrecht) .....   | 36 |
| Εικόνα 27. α) Η βασική αρχή λειτουργίας του DGPS, β) Οι πηγές σφαλμάτων του GPS.....   | 45 |
| Εικόνα 28. Συστήματα του μέλλοντος για υπηρεσίες CNS/ATM σύμφωνα με το πλάνο του ICAO .....  | 45 |
| Εικόνα 29. Το λειτουργικό διάγραμμα ενός SBAS συστήματος .....   | 46 |
| Εικόνα 30. α) Σχηματική αναπαράσταση της εγκατάστασης και της λειτουργίας του συστήματος GBAS, β) Φωτογραφία από εγκατάσταση πειραματικού συστήματος GBAS .....  | 47 |
| Εικόνα 31. α) Διαδικασία συμβατικής πλοήγησης, β) Διαδικασία PBN (ICAO_Doc9613, 2008).....   | 47 |
| Εικόνα 32. Στάχτη από την έκρηξη του ηφαιστείου Mt. St. Helens, Washington. Θραύσμα 7μm που περισυνέλεξε αεροσκάφος σε ύψος 18.3km επάνω από το Wyoming στις 21 Μαΐου 1980. (Heiken, 1991).....  | 51 |
| Εικόνα 33. Απεικόνιση του διαχωρισμού της τέφρας μέσω της καθίζησης (Berbente, 2011).....  | 53 |
| Εικόνα 34. Σχηματική αναπαράσταση των συναρτήσεων σχετικού κινδύνου (κινητήρων, τριβής και συνολικού) συναρτήσει των διαστάσεων των κόκκων της τέφρας. (Berbente, 2011) .....  | 54 |
| Εικόνα 35. Αερομεταφερόμενη μονάδα (κλασική επί τόπου δειγματοληψία- in situ) (Berbente, 2011)...  | 55 |

|   |     |
|---|-----|
| Εικόνα 36. Τεχνικές μέτρησης ηφαιστειακής τέφρας (Berbente, 2011) .....   | 56  |
| Εικόνα 37. Το σύστημα AVOID της easyJet (Berbente, 2011) .....  | 57  |
| Εικόνα 38. Αεροδρόμια που επηρεάστηκαν από ηφαιστειακή δραστηριότητα από το 1944-2006<br>(Guffanti, Mayberry, Casadevall, & Wunderman, 2008) .....  | 59  |
| Εικόνα 39. Υπόστεγα στην πολεμική αεροπορική βάση Clark, Philippines, πριν (10 Ιουνίου 1991) και<br>μετά (24 Ιουνίου 1991) από την έκρηξη της 15ης Ιουνίου 1991 (Casadewall, 1993).....   | 60  |
| Εικόνα 40. DC-10 στο έδαφος καλυμμένο από ηφαιστειακή τέφρα στην Cubi Point Naval Air Station<br>στις Φιλιππίνες. (Casadewall, 1993).....   | 61  |
| Εικόνα 41. Επίδραση της ηφαιστειακής τέφρας στον κινητήρα (Airbus tech manual).....   | 66  |
| Εικόνα 42. Περιοχές του αεροσκάφους (χρωματισμένες με κόκκινο) που επηρεάζονται άμεσα από την<br>είσοδο του αεροσκάφους σε ηφαιστειακό νέφος (Berbente, 2011).....  | 67  |
| Εικόνα 43. Οργάνωση του International Airways Volcano Watch (ICAO_Doc9691, 2007). .....   | 71  |
| Εικόνα 44. Οδηγία που εκδόθηκε από το Γραφείο της Τουλούζης για την έκρηξη της Αίτνας στις<br>13/05/2008 (Φωτάκος, 2010) .....  | 74  |
| Εικόνα 45. Περιοχές ευθύνης των εννέα VAACs που απαρτίζουν το IAVW (ICAO_Doc9766, 2004)....   | 76  |
| Εικόνα 46. Η Ισλανδία βρίσκεται στη γραμμή της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού (Case Study:<br>Eyjafjallajökull, Iceland 2010) .....  | 83  |
| Εικόνα 47. α) Ηφαιστειακό νέφος πλούσιο σε ατμό την πρώτη μέρα της έκρηξης του Eyjafjallajökull 14<br>Απριλίου 14:27. Όψη από την βόρεια πλευρά. Φωτογραφία: Armann Höskuldsson (Zehner, 2010)<br>β) Κεραυνός κατά τη διάρκεια της έκρηξης του Eyjafjallajökull λόγω του ηλεκτρικού φορτίου στη<br>στήλη τέφρας ..... | 85  |
| Εικόνα 48. Γενική επισκόπηση της έκτασης του ηφαιστειακού νέφους και των περιοχών που επλήγησαν<br>από την απαγόρευση πτήσεων (Iceland volcano in maps, 2010) .....   | 86  |
| Εικόνα 49. Ταινίες «πάγου» επάνω στον παγετώνα Eyjafjallajökull, ο οποίος είναι καλυμμένος από τέφρα<br>(Eyjafjallajökull case study). .....  | 87  |
| Εικόνα 50. Η έκρηξη του Eyjafjallajökull καθώς και η στήλη τέφρας την 17 <sup>η</sup> Απριλίου. Φωτογραφία:<br>Jens Hesselbjerg Christensen, Danish Met Institute (Mylne, 2010). .....  | 88  |
| Εικόνα 51. Περιοχές ευθύνης των επιμέρους Συμβουλευτικών Κέντρων Ηφαιστειακής Τέφρας (VAACs).<br>Η Ισλανδία ανήκει στο London VAAC. (London_MWO, 2010).....   | 89  |
| Εικόνα 52. Συμβουλευτικό γράφημα κίνησης της τέφρας σε διάστημα ενός 24ώρου (Mylne, 2010). .....  | 91  |
| Εικόνα 53. Γράφημα όπου παρουσιάζεται η συγκέντρωση τέφρας εντός του νέφους την 20 <sup>η</sup> Απριλίου<br>2010 (Mylne, 2010) .....  | 91  |
| Εικόνα 54. Προσομοίωση στο FLEXPART την επόμενη της έκρηξης και το γράφημα δείχνει την<br>πρόβλεψη για δύο μέρες μετά. Δεν διευκρινίζονται ακριβή επίπεδα συγκέντρωσης παρά μόνο ο<br>χαρακτηρισμός με χρώμα και η αντιστοιχία με την μπάρα που δείχνει την κλίμακα.(Norwegian<br>Institute for Air Research) .....   | 94  |
| Εικόνα 55. Αεροπορικές μεταφορές στην Ευρώπη πριν και κατά τη διάρκεια της κρίσης.<br>(STATFOR_Doc394, 2010) .....  | 98  |
| Εικόνα 56. Τοποθεσίες ηφαιστειών που απειλούν την ευρωπαϊκή αεροναυτιλία (Peter Sammonds, 2010)<br>.....  | 101 |

## Συντομογραφίες

|        |  |
|--------|--|
| ACC    | Area Control Center                              |
| AFTN   | Aeronautical Fixed Telecommunication Network     |
| AIS    | Aeronautical Information Service                 |
| ATC    | Air Traffic Control                              |
| AVHRR  | Advanced Very High Resolution Radiometer         |
| AVOID  | Airborne Volcanic Object Identifier and Detector |
| DME    | Distance Monitoring Equipment                    |
| EASA   | European Aviation Safety Agency                  |
| FIC    | Flight Information Center                        |
| FIR    | Flight Information Region                        |
| FMS    | Flight Management System                         |
| GBAS   | Ground Based Augmentation System                 |
| GNSS   | Global Navigation Satellite System               |
| GPS    | Global Positioning System                        |
| IATA   | International Air Transport Association          |
| IAVW   | International Airways Volcano Watch              |
| IFR    | Instrument Flight Rules                          |
| ILS    | Instrument Landing System                        |
| IVATF  | International Volcanic Ash Task Force            |
| LIDAR  | Light Detection and Ranging                      |
| MWO    | Meteorological Watch Office                      |
| NOAA   | National Oceanic and Atmospheric Administration  |
| NOTAM  | Notice To Air Men                                |
| NWP    | Numerical Weather Prediction                     |
| PBN    | Precision Based Navigation                       |
| SIGMET | Significant Meteorological Advisory              |
| TGSD   | Total Grain Size Distribution                    |
| UNDRO  | United Nations Disaster Relief Organization      |
| VAAC   | Volcanic Ash Advisory Center                     |
| VAC    | Volcanic Ash Cloud                               |
| VAR    | Volcanic Activity Reporting                      |
| VATDM  | Volcanic Ash Transport and Dispersal Model       |
| VDC    | Volcanic Dust Contamination                      |
| VFR    | Visual Flight Rules                              |
| VOR    | VHF Omnidirectional Range                        |
| VPE    | Volcanic Pyroclastic Eruption                    |
| WMO    | World Meteorological Organization                |
| WOVO   | World Organization of Volcano Observatories      |

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ερευνητικό αντικείμενο

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα αποτελεί αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος για τη γεωλογία, τη σεισμολογία και γενικότερα τις γεωεπιστήμες. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι μορφές φυσικών φαινομένων, οι οποίες από την αρχή της ανθρώπινης ιστορίας ευθύνονται για την κατάρρευση και εξαφάνιση ολόκληρων πόλεων και την απώλεια εκατοντάδων χιλιάδων ανθρωπίνων ζώων. Εσχάτως λόγω της ανάπτυξης της αεροπορίας και ιδιαιτέρως των εναερίων μεταφορών τόσο επιβατών όσο και εμπορευμάτων έχουν προστεθεί στους κινδύνους λόγω ηφαιστειακής έκρηξης, οι κίνδυνοι για την ασφάλεια της εναέριας κυκλοφορίας και οι οικονομικοί κίνδυνοι από τις συνέπειες της μείωσης της εναέριας κυκλοφορίας.

Η διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας έχει ως κύρια προτεραιότητα την ασφάλεια των επιβατών, αλλά με αφορμή την κρίση που δημιούργησε η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull το 2010 αναδείχθηκε εκ νέου η ανάγκη για ελαχιστοποίηση των οικονομικών επιπτώσεων από την επίδραση της ηφαιστειακής δραστηριότητας στην αεροναυτιλία. Η βέλτιστη λύση για ασφαλή εναέρια κυκλοφορία που θα επιτυγχάνει το συγκερασμό των προαναφερθέντων αντικρουόμενων παραγόντων, απαιτεί την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ηφαιστειακής έκρηξης και ειδικότερα την πρόβλεψη της μεταφοράς και εναπόθεσης της ηφαιστειακής τέφρας. Η συνεργασία επιστημόνων από το χώρο της γεωλογίας και ηφαιστειολογίας, τον τομέα της μετεωρολογίας και αυτόν της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος σε συνδυασμό με επαγγελματίες από το χώρο της εναέριας κυκλοφορίας και συγκεκριμένα όσων εξειδικεύονται στη διαχείριση της ασφάλεια στην αεροναυτιλία, θα αποτελούσε εχέγγυο για την επιτυχία και την πληρότητα του εγχειρήματος.

Η υιοθέτηση βελτιωμένων επιχειρησιακών διαδικασιών, αποδοτικότερων και ακριβέστερων τεχνικών μετρήσεων και συστημάτων ανίχνευσης της ηφαιστειακής τέφρας και των χαρακτηριστικών της, μοντέλων πρόβλεψης των ηφαιστειακών κινδύνων στην αεροναυτιλία από τα νέφη τέφρας που θα προσεγγίζουν βέλτιστα την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου είναι μερικά από τα βήματα στην κατεύθυνση της βελτίωσης στις μεθόδους αντιμετώπισης των ηφαιστειακών εκρήξεων.

Απώτερος σκοπός είναι η βελτίωση της παρεχόμενης πρόγνωσης και η αποφυγή των ηφαιστειακών κινδύνων και των άμεσων και έμμεσων επιπτώσεών τους στην αεροναυτιλία.

## 1.2 Σκοπός της διατριβής

Σκοπός της διατριβής είναι η ενδελεχής εξέταση των θεμάτων που αφορούν στον αντίκτυπο της ηφαιστειακής δραστηριότητας στην Αεροναυτιλία. Προκειμένου να δοθεί το ελάχιστο κοινό γνωστικό υπόβαθρο που απαιτείται για την προσέγγιση του θέματος από επιστήμονες και επαγγελματίες διαφορετικών ειδικοτήτων, γίνεται εισαγωγή στις έννοιες που αφορούν τα ηφαίστεια ως φυσικό φαινόμενο αφενός και την

αεροναυτιλία και το αεροπορικό έργο αφετέρου. Από την παρουσίαση της υπάρχουσας κατάστασης αναφορικά με τη διαχείριση ηφαιστειακών κρίσεων και από την πρόσφατη έρευνα σε θέματα πρόβλεψης της μετακίνησης του ηφαιστειακού νέφους και απόθεσης της ηφαιστειακής τέφρας, οδηγούμαστε σε μια σειρά προτάσεων βελτίωσης των ερευνητικών και επιχειρησιακών μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Μείζων στόχος της διατριβής είναι να παρουσιάσει τις τεχνολογικές εξελίξεις από τα διαφορετικά ερευνητικά αντικείμενα και να προτείνει βελτιώσεις με έμφαση στη σύνθεση μοντέλων και τεχνικών και τη συνεργασία των αρμοδίων οργανισμών και φορέων για βελτιωμένες λύσεις και συνολικότερη αντιμετώπιση του θέματος με έμφαση στην ασφάλεια, την ποιότητα, την αποδοτικότητα και την οικονομία.

### 1.3 Δομή της διατριβής

Η παρούσα διατριβή είναι δομημένη σε δύο βασικά επίπεδα που αποτελούν τα δύο ερευνητικά πεδία επί των οποίων και βασίζεται. Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή επί του αντικείμενου της διατριβής, των θεμάτων που θα αναπτυχθούν και αναλυθούν στη συνέχεια και της δομής που θα ακολουθηθεί.

Το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αφορά τον πρώτο ερευνητικό πυλώνα της διατριβής και συγκεκριμένα το φαινόμενο των ηφαιστειών από τη σκοπιά των γεωεπιστημών. Δίνονται στοιχεία για τον τρόπο και τις θέσεις ανάπτυξης ηφαιστειών και περιγράφονται οι πλέον σημαντικοί τύποι τους, καθώς και οι ιδιαίτερες ηφαιστειακές δομές.

Το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρεται στον τομέα της ηφαιστειακής δραστηριότητας και συγκεκριμένα στις εκρήξεις. Περιγράφονται σε αυτό οι δύο βασικές κατηγορίες εκρήξεων μαγματικές και υδρομαγματικές και οι υποκατηγορίες της καθεμιάς εξ' αυτών. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύονται τα προϊόντα ηφαιστειακών εκρήξεων και συγκεκριμένα τα ηφαιστειακά αέρια και η ηφαιστειακή τέφρα, καθώς και οι επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται το τμήμα που σχετίζεται άμεσα με την αεροπορία και την αεροναυτιλία. Στις ενότητες του κεφαλαίου γίνεται παρουσίαση της ιστορικής εξέλιξης της αεροπορίας και αναφέρονται με σύντομη ερμηνεία κάποιες αεροπορικές έννοιες. Δίνεται ο ορισμός του αεροπορικού κινδύνου και τα στοιχεία που τον απαρτίζουν. Περιγράφονται άρχες λειτουργίας και επιχειρησιακή σκοπιμότητα των σύγχρονων διαδικασιών πλοήγησης ακριβείας.

Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> εξειδικεύεται η περιγραφή των αεροπορικών κινδύνων σε σχέση με τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Αποσαφηνίζεται η διαφορά μεταξύ ηφαιστειακής στάχτης και σκόνης, όχι μόνο ως προς τα φυσικά και χημικά τους χαρακτηριστικά αλλά και ως προς τις μεθόδους εντοπισμού τους. Παρουσιάζονται οι επιπτώσεις τους στα αεροδρόμια και η αντιμετώπισή τους με πάγιες διαδικασίες. Εν συνεχεία περιγράφονται κίνδυνοι για τα αεροπλάνα, επιπτώσεις στην αεροδυναμική, στο κινητήρα και τα ηλεκτρονικά συστήματά τους. Ακολούθως στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο σύστημα του ICAO για την υποστήριξη της αεροναυτιλίας σε καταστάσεις ηφαιστειακής κρίσης και αναδεικνύονται οι ρόλοι των φορέων που τον

απαρτίζουν. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα VAAC και στα μοντέλα διασποράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας που αυτά χρησιμοποιούν για πρόβλεψη της εξέλιξης των φαινομένων.

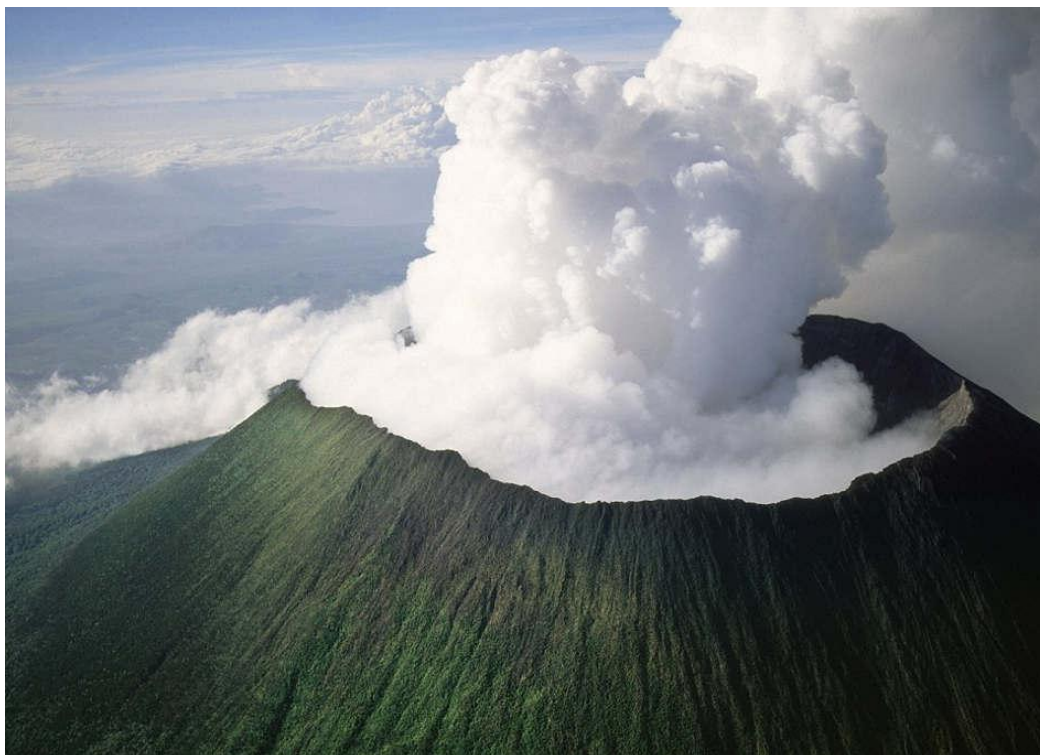
Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η χαρακτηριστική περίπτωση του ηφαιστείου Eyjafjallajökull που δημιούργησε την κρίση στην αεροπλοΐα τον Απρίλιο – Μάιο 2010. Γίνεται σύντομη αναφορά σε ιστορικά στοιχεία και ανάλυση της εξέλιξης του φαινομένου. Επιμέρους ενότητες περιγράφουν μετεωρολογικά στοιχεία, αποτελέσματα προγνώσεων και αποτελέσματα μελετών που πραγματοποιήθηκαν με αφορμή τη συγκεκριμένη έκρηξη. Σε ξεχωριστή υποενότητα του κεφαλαίου αναλύονται οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στην αεροναυτιλία με έμφαση στα οικονομικά στοιχεία. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αναφέρονται ηφαίστεια στον ευρωπαϊκό χώρο που δυνητικά θα μπορούσαν να αποτελέσουν κίνδυνο για την ασφάλεια της αεροναυτιλίας σε ενδεχόμενη έκρηξη.

Στο 7<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης, καθώς και στοιχεία μελλοντικής έρευνας επί του αντικειμένου.

## 2 Ηφαίστεια

### 2.1 Τι είναι Ηφαίστειο

Ο όρος προέρχεται από τον Ήφαιστο θεό της φωτιάς κατά την αρχαιότητα. Με τον όρο ηφαίστειο κατά κύριο λόγο, εννοούμε ένα φυσικό σύστημα, δια μέσω του οποίου μεταφέρονται στην επιφάνεια της γης στερεά (λάβα) και υγρά αναβλύσματα, θερμά διαλύματα και αέριες φάσεις βαθιάς προέλευσης. Παράλληλα πραγματοποιείται μεταφορά θερμικής ενέργειας από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά τμήματα της γης.

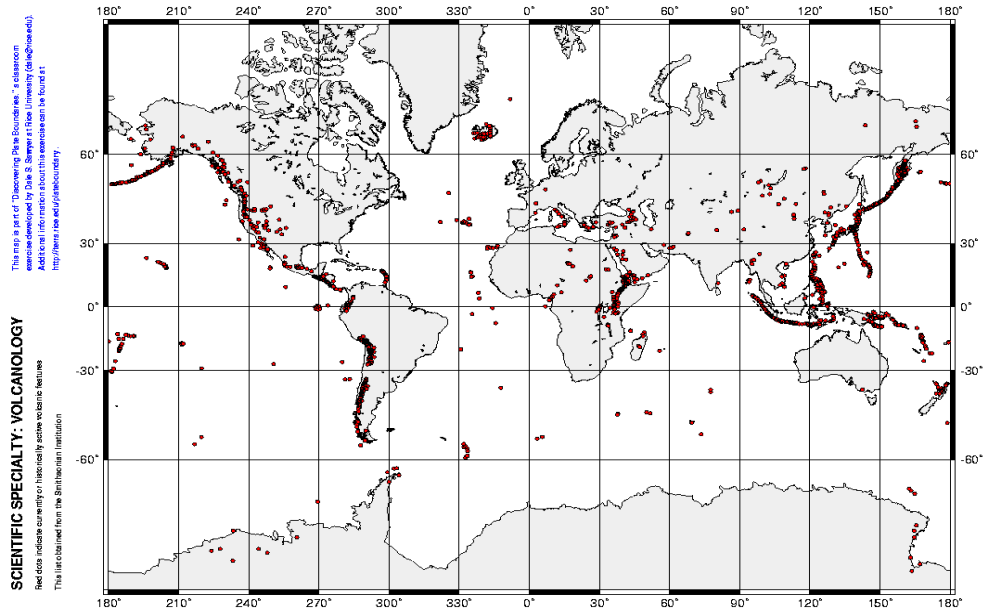


**Εικόνα 1.** Ηφαίστειο Nyiragongo στη δυτική ακτή του Κονγκό (WordlessTech-Robert Harding).

Ένα ηφαίστειο χαρακτηρίζεται ως ενεργό εάν έχει καταγραφεί κάποια δραστηριότητα του κατά την διάρκεια των ιστορικών χρόνων. Αντίθετα αν έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη κάποιου ηφαιστείου αλλά δεν υπάρχει καμία καταγραφή δραστηριότητάς του στους ιστορικούς χρόνους το ηφαίστειο χαρακτηρίζεται *κοιμώμενο* (εν υπνώσει), ενώ ένα ηφαίστειο, το οποίο δεν έχει δραστηριοποιηθεί τα τελευταία 10.000 χρόνια θεωρείται *σβησμένο*. Με τον παραπάνω όρο χαρακτηρίζεται το ηφαίστειο που όλα τα δεδομένα δείχνουν πως έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του και έχει πλέον απονεκρωθεί, γεγονός που αντιστοιχεί στην οριστική απολίθωση του υπογείου δικτύου μαγματικής κυκλοφορίας που το τροφοδοτούσε.

### 2.2 Δημιουργία ηφαιστείων – σημεία ανάπτυξης

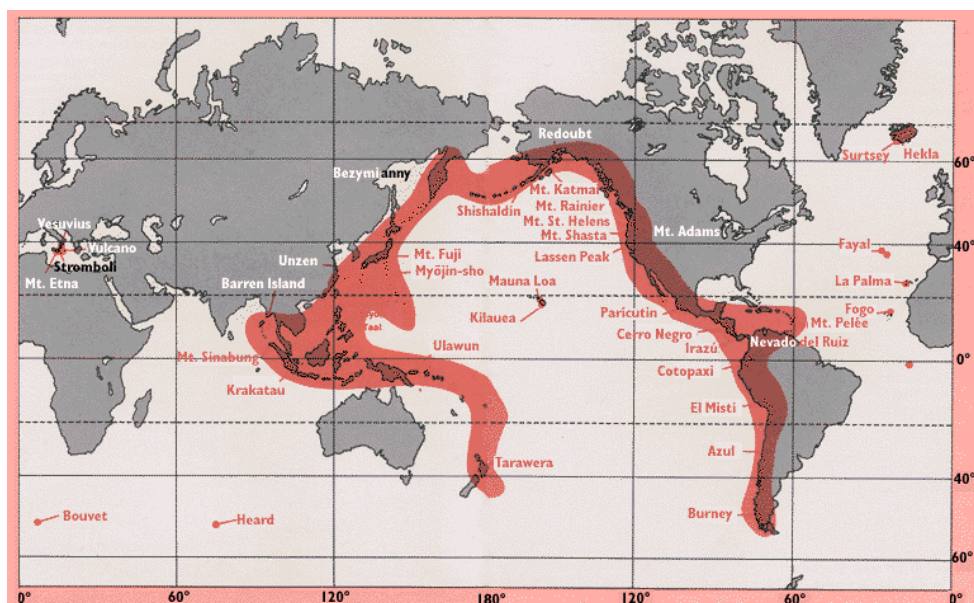
Η εκδήλωση ενός ηφαιστείου δεν είναι κατά κανόνα ένα τυχαίο γεγονός και αυτό αποδεικνύεται από την γεωγραφική κατανομή των ενεργών ηφαιστείων σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 2. Παγκόσμια κατανομή των ηφαιστειακών κέντρων (<http://terra.rice.edu/plateboundary>).

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα εντοπίζεται σε συγκεκριμένες γραμμές που σχεδόν συμπίπτουν με τις σεισμικά ενεργές ζώνες της γης και γενικά ταυτίζονται με όρια απόκλισης, σύγκλισης και σύγκρουσης λιθосφαιρικών πλακών. Στα εσωτερικά τμήματα των λιθосφαιρικών πλακών καταγράφεται σχετικά μικρό ποσοστό ηφαιστειακής δραστηριότητας. Με δεδομένο ότι η ηφαιστειότητα συνδέεται με διαδικασίες στα όρια πλακών διακρίνουμε τρεις μεγάλες γραμμές ενεργών ηφαιστείων.

Τα ηφαίστεια των μεσοωκεάνιων ράχων, η μεγαλύτερη διαχρονική δομή στην επιφάνεια της γης, με συνολικό μήκος μεγαλύτερο από 84.000km. Οι μεσοωκεάνιες ράχες είναι πάνω σε αποκλίνοντα όρια λιθосφαιρικών πλακών όπου διεισδύει μάγμα διαρκώς και εκχύνεται λάβα στους ωκεάνιους πυθμένες.



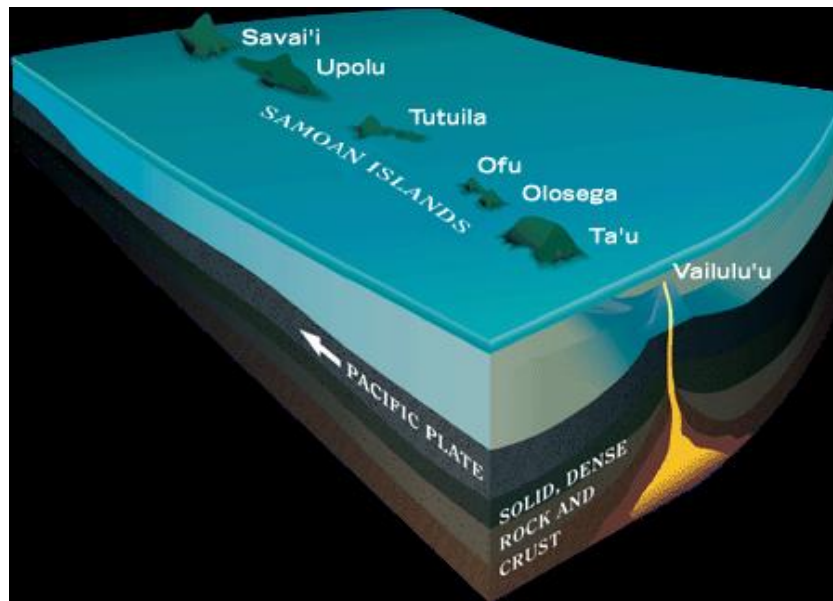
Εικόνα 3. Η περί-ειρηνική ζώνη (USGS).



Τα ηφαίστεια κατά μήκος της *περί-ειρηνικής ζώνης*, σχηματίζουν το «δακτύλιο της φωτιάς» (Ring of fire) και συνδέονται με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών.

Και τη *Μεσογειακή-μεσοασιατική γραμμή*, που παραλαμβάνει το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο, τα ηφαίστεια της νοτίου Ιταλίας και τα ηφαίστεια της ζώνης Καυκάσου-Αρμενίας-Ιμαλαΐων, ηφαιστειότητα που επίσης συνδέεται με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών.

Η ηφαιστειότητα στα εσωτερικά τμήματα των πλακών συνδέεται με *hot spots* (θερμές κηλίδες) ή με πρώιμες φάσεις διάνοιξης ενός νέου ωκεανού (Παπανικολάου & Σίδερης, 2008).



Εικόνα 4. Σχηματική παράσταση “Hot Spot” (WHOI -Jayne Doucette)

Αναλογικά η ποσότητα μάγματος που παράγεται σε διαφορετικά γεωτεκτονικά υπερβάλλοντα είναι μεσοωκεάνιων ράχων 62%, ηφαιστειακού τόξου 26% και θερμών κηλίδων 12% (Κυριακόπουλος, 2003).


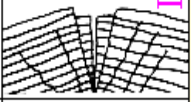



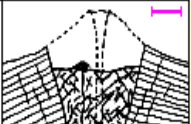
### 2.3 Κύριοι τύποι ηφαιστειών

Από τη μελέτη του τύπου της ηφαιστειακής δραστηριότητας και του είδους των εσωτερικών και εξωτερικών δομικών χαρακτηριστικών των ηφαιστειακών οικοδομημάτων που προκύπτουν, αποδεικνύεται ότι σε ορισμένου είδους εκρήξεων αντιστοιχούν ανάλογες μορφές ηφαιστειών.

Μεταξύ των σημαντικότερων παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για την ταξινόμηση των ηφαιστειών είναι:

- Η μορφή του αγωγού από τον οποίο εξέρχονται τα ηφαιστειακά προϊόντα.
- Η σύσταση του μάγματος (βασικό, ενδιάμεσο, όξινο μάγμα).
- Η ποσότητα του εγχυμένου μάγματος και
- Το είδος της ηφαιστειακής δράσης.

Οι κυριότερες κατηγορίες ηφαιστείων αναλύονται στις ενότητες που ακολουθούν.

| <b>Types of Volcanoes</b>         |  |   |  |
|-----------------------------------|--|---|--|
| Volcano Type                      | Characteristics  | Examples  | Simplified Diagram   |
| <b>Flood or Plateau Basalt</b>    | Very liquid lava; flows very widespread; emitted from fractures  | Columbia River Plateau  |   |
| <b>Shield Volcano</b>             | Liquid lava emitted from a central vent; large; sometimes has a collapse caldera                                   | Larch Mountain, Mount Sylvania, Highland Butte, Hawaiian volcanoes                      |   |
| <b>Cinder Cone</b>                | Explosive liquid lava; small; emitted from a central vent; if continued long enough, may build up a shield volcano | Mount Tabor, Mount Zion, Chamberlain Hill, Pilot Butte, Lava Butte, Craters of the Moon |   |
| <b>Composite or Stratovolcano</b> | More viscous lavas, much explosive (pyroclastic) debris; large, emitted from a central vent                        | Mount Baker, Mount Rainier, Mount St. Helens, Mount Hood, Mount Shasta                  |   |
| <b>Volcanic Dome</b>              | Very viscous lava; relatively small; can be explosive; commonly occurs adjacent to craters of composite volcanoes  | Novarupta, Mount St. Helens Lava Dome, Mount Lassen, Shastina, Mono Craters             |   |
| <b>Caldera</b>                    | Very large composite volcano collapsed after an explosive period; frequently associated with plug domes            | Crater Lake, Newberry, Kilauea, Long Valley, Medicine Lake, Yellowstone                 |  |

**USGS**

Topinka, USGS/CVO, 1997, Modified from: Allen, 1975, Volcanoes of the Portland Area, Oregon, Ore-Bin, v.37, no.9

Εικόνα 5: Τύποι ηφαιστείων σύμφωνα με το USGS

### 2.3.1 Βασαλτικά υψίπεδα (Plateaux)

Οροπέδια λάβας σχηματίζονται από βασαλτική λάβα κατά τη διάρκεια πολλών διαδοχικών εκρήξεων μέσω πολλών αεραγωγών, χωρίς να σημειώνονται βίαιες εκρήξεις (ήσυχες εκρήξεις). Οι εκρήξεις αυτές είναι ήσυχες, λόγω του χαμηλού ιξώδους της λάβας, και της μικρής ποσότητας παγιδευμένων αερίων. Η προκύπτουσα ροή λάβας μπορεί να εξωθείται μέσα από γραμμικές σχισμές ή χάσματα ή γιγάντιες εκρήξεις ηφαιστείων μέσα από πολλαπλές διόδους που παράγουν γιγάντιες ροές βασαλτών. Πολλαπλές διαδοχικές και εκτεταμένες ροές λάβας καλύπτουν το αρχικό τοπίο για να σχηματίσουν τελικά ένα οροπέδιο, το οποίο μπορεί να περιέχει πεδία λάβας, κώνους σκωριών, ασπιδόμορφα ηφαίστεια και άλλες ηφαιστειακές γεωμορφές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα οροπέδιο λάβας μπορεί να είναι μέρος ενός ενιαίου ηφαιστείου. Ένα παράδειγμα είναι στο βόρειο τμήμα της British Columbia, στον Καναδά που καλύπτει μια έκταση  $1.800 \text{ km}^2$  και όγκο  $860 \text{ km}^3$ .

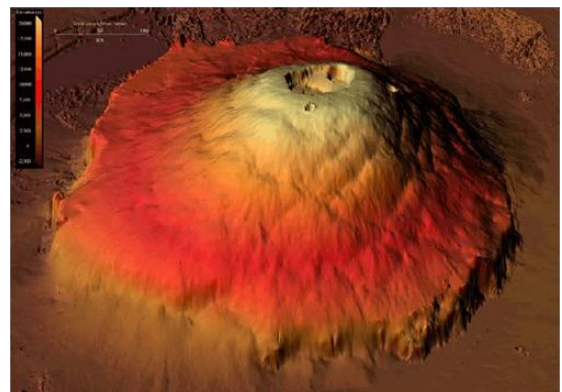
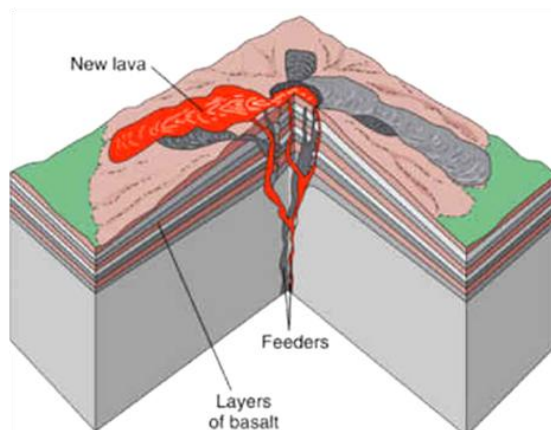


**Εικόνα 6:** Το Chiasm Provincial Park στο Chilcotin Plateau Basalts στον Καναδά.

Λόγω μεγάλης ρευστότητας της λάβας, τα ηφαιστειακά κτίσματα που σχηματίζονται έχουν μικρό ύψος και η λάβα εξαπλώνεται σε εκατοντάδες χιλιόμετρα.

### 2.3.2 Ασπιδόμορφα ηφαίστεια

Ασπιδόμορφα ηφαίστεια χαρακτηρίζονται τα ηφαιστειακά οικοδομήματα με μεγάλη επιφανειακή εξάπλωση και πολύ μεγάλο μέγεθος, τα οποία είναι κτισμένα από επάλληλα στρώματα λάβας. Τα Ασπιδόμορφα ηφαίστεια δημιουργούνται επάνω από θερμές κηλίδες σε βάθος εκατομμυρίων ετών, οι γωνίες κλίσης των ηφαιστείων αυτών είναι αρκετά μικρές, της τάξης των 4 -5 μοιρών.



**Εικόνα 7.** α) Ασπιδόμορφο ηφαίστριο (Department of Geography, Hunter College, City University of New York), β) Το ασπιδόμορφο ηφαίστριο Όλυμπος στον Άρη (<http://www.olympusmons.com>).

Το πλατύ τους σχήμα οφείλεται στην έκχυση ρευστής (χαμηλού ιξώδους) βασαλτικής λάβας (*basaltic lava*), η οποία, μετά την έξοδό της από τον κρατήρα του ηφαιστείου, απλώνεται πλευρικά. Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσει η λάβα είναι της τάξης των δεκάδων χιλιομέτρων.

Τα πλέον γνωστά ηφαίστεια αυτής της κατηγορίας είναι τα Mauna Loa και Mauna Kea της Hawaii. Το Mauna Loa έχει ύψος 4168m από την επιφάνεια της θάλασσας και 8534m αν το μετρήσουμε από την βάση του στον πυθμένα του ωκεανού. Το μεγαλύτερο Ασπιδόμορφο ηφαίστριο του ηλιακού μας συστήματος είναι το όρος Όλυμπος του πλανήτη Άρη με 27km ύψος επάνω από τον περιβάλλοντα χώρο του και περίμετρο 550km.

### 2.3.3 Κώνος σκωριών (Cinder cone)

Ο κώνος σκωριών είναι ο συνηθέστερος και ο μικρότερος τύπος ηφαιστείου με τυπικό ύψος κάτω από 300m. Ηφαίστεια αυτού του τύπου βρίσκονται είτε ως ξεχωριστά ηφαίστεια σε πεδία βασαλτικών λαβών, είτε ως παρασιτικοί κώνοι στις πλευρές ασπιδόμορφων ηφαιστειών και στρωματοηφαιστειών. Οι κώνοι σκωριών αποτελούνται κυρίως από βασαλτική τέφρα (*basaltic tephra*) που εκτοξεύεται από το ηφαίστριο.

Οι κώνοι σκωριών εμφανίζουν απότομες πλευρές, έως 35 μοίρες, μολονότι στους παλαιότερους και πιο διαβρωμένους κώνους οι πλευρές είναι πιο ομαλές, από 15 έως 20 μοίρες. Οι κώνοι σκωριών, αντίθετα από τους άλλους δύο τύπους ηφαιστειών, έχουν ευθείες πλευρές και πολύ μεγάλους κρατήρες σε σχέση με το μικρό μέγεθός τους. Αντιπροσωπευτικά ηφαίστεια αυτού του τύπου είναι το Στρόμπολι και η Σαντορίνη.



Εικόνα 8. Ηφαίστριο τύπου κώνου σκωριών (USGS, J.P. Lockwood, 1975)



Εικόνα 9. Το ηφαίστειο τύπου κώνου σκωριών Stromboli (USGS, B. Chouet, 1992).

#### 2.3.4 Στρωματοηφαίστεια ή μεικτά ηφαίστεια

Ο όρος Στρωματοηφαίστεια χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις των ηφαιστειών στα οποία εναλλάσσονται εκχύσεις συμπαγούς λάβας και ασύνδετων πυροκλαστικών προϊόντων.

Τα στρωματοηφαίστεια έχουν μια πολυεπίπεδη ή στρωματοποιημένη δομή με εναλλασσόμενες ροές λάβας, τέφρας, πυροκλαστικά ρεύματα, ηφαιστειακή λάσπη (λαχάρ) και ροές κορημάτων. Η σύνθεση τού φάσματος αυτών των τύπων πετρωμάτων μπορεί να διαφέρει από βασάλτη σε ρυόλιθο σε ένα ενιαίο ηφαίστειο. Ωστόσο, ο μέσος όρος της συνολικής σύνθεσης των στρωματοηφαιστειών είναι ανδεσιτική. Πολλά ωκεάνια στρωματοηφαίστεια τείνουν να είναι πιο βασαλτικά από τα ηπειρωτικά ομόλογά τους.

Η διαβάθμιση των μεικτών ηφαιστειών γίνεται με κριτήριο το δείκτη εκρηκτικότητας τους  $E$  που λαμβάνει τιμές από 11 έως 99 (Κυριακόπουλος, 2003).

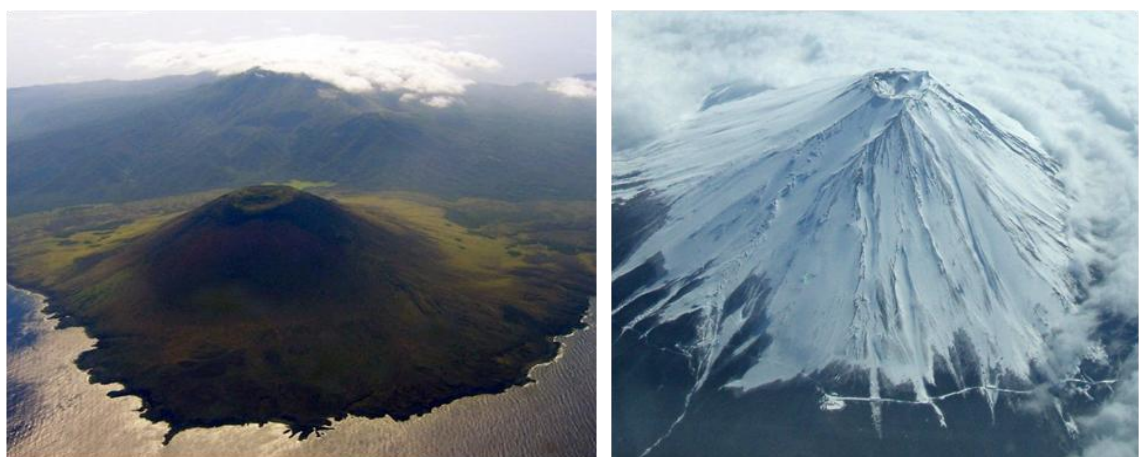
Τυπική κατηγοριοποίηση των ηφαιστειών με βάση το δείκτη  $E$  είναι η ακόλουθη.

- |   |                  |
|---|------------------|
| ○ Ηφαίστεια πλούσια σε λάβα               | $11 < E < 33$    |
| ○ Ηφαίστεια ενδιάμεσα η κανονικά          | $34 < E < 66$    |
| ○ Ηφαίστεια πλούσια σε πυροκλαστικά υλικά | $67 < E < 90-95$ |



**Εικόνα 10.** Εγκάρσια τομή στρωματοηφαιστείου

Τα στρωματοηφαίστεια είναι ο πιο κοινός τύπος ηφαιστείων και τα πιο φονικά στους παροξυσμούς τους. Οι χαμηλότερες πλαγιές τους είναι ήπιες αλλά έχουν απότομες κλίσεις κοντά στην κορυφή τους δημιουργώντας μια συνολική μορφολογία, η οποία είναι κοίλη προς τα επάνω. Η περιοχή της κορυφής περιλαμβάνει συνήθως ένα εκπληκτικά μικρό κρατήρα. Ο κλασικός τύπος στρωματοηφαιστείων αναγνωρίζεται σε πολλά γνωστά ηφαίστεια όπως το Mt Fuji στην Ιαπωνία, Mt Mayon στις Φιλιππίνες και το Mt Etna στην Ιταλία.



**Εικόνα 11. α)** Το στρωματοηφαίστειο Mt Mayon στις Φιλιππίνες, **β)** Το στρωματοηφαίστειο Fuji στην Ιαπωνία

### 2.3.5 Ηφαιστειακοί Θόλοι

Οι ηφαιστειακοί θόλοι είναι αναχώματα τα οποία διαμορφώνονται όταν παχύρρευστη λάβα εξέρχεται αργά και συσσωρεύεται επάνω από τον ηφαιστειακό πόρο και δεν διαχέεται σαν ροή λάβας. Οι πλευρές των περισσότερων ηφαιστειακών θόλων είναι πολύ απότομες και συνήθως επικαλύπτονται από θραύσματα βράχων, που σχηματίζονται κατά την διάρκεια δημιουργίας του θόλου και λόγω της θραύσης των υπερκείμενων πετρωμάτων. Οι περισσότεροι θόλοι αποτελούνται από λάβα υψηλού ιξώδους, η οποία στερεοποιείται επιφανειακά και γι αυτό δεν ρέει ελεύθερα. Η εσωτερική πίεση όμως συνεχίζει να προκαλεί εξόγκωση του θόλου, που ακόμη διατηρείται σε ημιπλαστική κατάσταση και η νέα λάβα που εγχύνεται, τροφοδοτεί το κεντρικό τμήμα του θόλου.



**Εικόνα 12.** Ηφαιστειακοί θόλοι στο βασαλτικό πλατό στην δυτική Σαουδική Αραβία. (Vic Camp).

Οι παραπάνω δομές δεν επιτρέπουν την έξοδο αερίων, η συσσώρευση όμως των αερίων μπορεί να προκαλέσει έκρηξη κατά την διάρκεια της εξώθησης του θόλου.



**Εικόνα 13: α)** Το Anak Kelud στην Ινδονησία 6 Δεκ. 2007 (CVGHM, Indonesia), **β)** Το "Anak Kelud στην Ινδονησία 26.1.2008. Το στόμιο εισόδου της σήραγγας αποστράγγισης που προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του όγκου των υδάτων της λίμνης καλύπτεται τώρα από το θόλο λάβας (CVGHM, Indonesia).

Ο κύριος κίνδυνος που συνδέεται με τους θόλους είναι οι πυροκλαστικές ροές, που δημιουργούνται από τις εκρήξεις ή τις καταρρεύσεις των θόλων. Τέτοιες πυροκλαστικές ροές μπορούν να συμβούν χωρίς προειδοποίηση, κατά την διάρκεια της ενεργού ανάπτυξης του θόλου και μπορεί να κινηθούν με υψηλές ταχύτητες, θέτοντας σε κίνδυνο ζώες και περιουσίες, σε αποστάσεις μέχρι και 20 km από την πηγή τους, καθώς επίσης και να δημιουργήσουν λαχάρ, αν αναπτυχθούν σε εδάφη καλυμμένα από χιόνι. (Hoblitt, 1987)

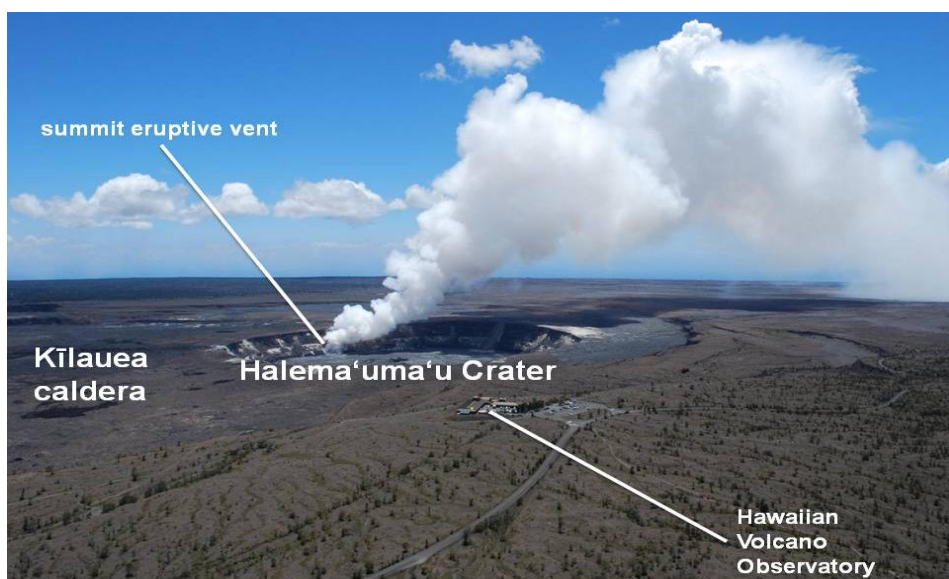
### 2.3.6 Καλδέρες

Είναι αρνητικές γεωμορφές που συνδέονται με ογκώδεις καταβυθίσεις που προκύπτουν λόγω μετακίνησης μαγματικών μαζών ή λόγω κατάρρευσης των υποκειμένων τμημάτων.



Εικόνα 14. Η καλδέρα της Σαντορίνης.

Διακρίνουμε δύο τύπους καλδέρας. Αυτές που σχετίζονται με τα ασπιδωτά ηφαιστεια και σχηματίζονται λόγω καταβύθισης των επιφανειακών τμημάτων των ηφαιστειών και αυτές που σχηματίζονται στα στρωματοηφαιστεια και δημιουργούνται σχεδόν στιγμιαία και είναι αποτέλεσμα κάποιας βίαιης έκρηξης του ηφαιστείου (Σαντορίνη, Βεζούβιος, κλπ.).



Εικόνα 15. Καλδέρα του ασπιδωτού ηφαιστείου Kilauea.



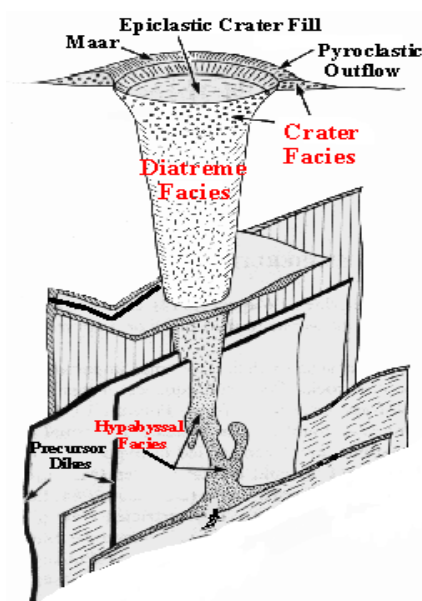
## 2.4 Δευτερεύουσες ηφαιστειακές δομές

### 2.4.1 Ηφαίστεια αερίων

Σε αυτά επικρατεί κυρίως ανέξοδος πηθικών συστατικών. Τα αέρια αναβλήματα εκτινάσσονται σε αρκετά μεγάλο ύψος στην ατμόσφαιρα και κατά την βίαιη εκτίναξή τους συμπαρασύρουν και στερεά σωματίδια, όπως είναι η ηφαιστειακή σποδός και η ηφαιστειακή άμμος.

### 2.4.2 Διάτρημα (Diatrema)

Ηφαίστεια στα οποία η δραστηριότητά τους εξαντλείται μετά από μία μόνο έκρηξη και ιδιαίτερος όταν πρόκειται για βίαιη ανέξοδο αερίων φάσεων.



Εικόνα 16. Σχηματική αναπαράσταση της φάσης διάτρημα.

Ο όρος αναφέρεται σε κοίλης μορφής βράχους ή σε ηφαιστειακή λατυποπαγή τέφρα, που δημιουργείται από εκρήξεις ή υδροστατικές δυνάμεις. Διάτρημα δημιουργείται και ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ρευστού μάγματος με υπόγεια ύδατα.

### 2.4.3 Μαάρ (Maar)

Μετά από συνεχείς εκρήξεις ενός ηφαιστείου αδειάζει το γειτονικό πέτρωμα, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μεγάλα βυθίσματα στο χώρο, γύρω από τον ηφαιστειακό αγωγό, τα οποία γεμίζουν με νερό και σχηματίζονται μικρές αβαθείς λίμνες.

### 3 Δράση Ηφαιστείου

#### 3.1 Ηφαιστειακές εκρήξεις

Η ταξινόμηση των ηφαιστειακών γεγονότων γίνονται με διάφορα ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια όπως :

- Ο τρόπος έκχυσης των μαγματικών προϊόντων
- Το σχήμα και οι διαστάσεις του ηφαιστειακού οικοδομήματος
- Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των ηφαιστειακών πετρωμάτων
- Το είδος του κρατήρα (πόρος)
- Ο βαθμός επικινδυνότητας

Οι ανωτέρω είναι οι σημαντικότεροι παράμετροι που λαμβάνονται υπ' όψιν.

##### 3.1.1 Μαγματικές εκρήξεις

###### 3.1.1.1 Εκρήξεις τύπου Hawaiian

Οι εκρήξεις τύπου Hawaiian είναι ένα είδος ηφαιστειακής έκρηξης που πήρέ το όνομα του από τα ηφαίστεια της Hawaii, περιοχή που χαρακτηρίζεται από αυτού του είδους τις εκρήξεις. Οι εκρήξεις τύπου Hawaiian είναι ο πιο ήρεμος τύπος ηφαιστειακών γεγονότων, που χαρακτηρίζεται από υπερβολικά ήρεμη ροή βασαλτικού τύπου λάβας με χαμηλή περιεκτικότητα σε αέρια. Ο όγκος του υλικού που εκτινάσσεται από εκρήξεις τύπου Hawaiian είναι λιγότερο από το μισό που βρέθηκε σε άλλους τύπους ηφαιστειακών εκρήξεων. Η σταθερή παραγωγή ποσοτήτων λάβας ενισχύει τη μεγάλη και ευρεία μορφή ενός ασπιδωτού ηφαιστείου. Οι εκρήξεις δεν είναι συγκεντρωμένες στον κεντρικό πόρο της κορυφής, όπως με άλλους τύπους ηφαιστείων, και συχνά εμφανίζονται σε αεραγωγούς γύρω από τον κώνο κορυφής και διαμέσου των σχισμών αυτών ρέουν στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι εκρήξεις τύπου Hawaiian συχνά αρχίζουν σαν μία γραμμή εκρήξεων κατά μήκος μιας σχισμής διεξόδου του μάγματος από το έδαφος, το λεγόμενο και «κουρτίνα της φωτιάς» (curtain of fire). Αυτό σταματά να συμβαίνει καθώς η έξοδος της λάβας επικεντρώνεται πλέον σε λίγες εξόδους. Το ιξώδες του μάγματος είναι ενδιάμεσο και το πάχος ροής της λάβας μπορεί να φθάσει από 1m έως 2m.

Στον κεντρικό κρατήρα η πυρακτωμένη λάβα διατηρείται σε αναβράζουσα κατάσταση και συνεχώς εκχύνεται με αποτέλεσμα να μην στερεοποιείται και να μην αποφράσει το στόμιο εξόδου.

Ο υψηλότερος παρατηρηθείς πίδακας λάβας στη Hawaii ήταν λίγο πάνω από 500m (κατά τη διάρκεια των εκρήξεων του 1959 στο Kilauea Iki και 1969 στο Mauna Ulu). Το ρεκόρ του υψηλότερου πίδακα λάβας τύπου Hawaiian ανήκει στην έκρηξη του 1986 ηφαιστείου Izu Oshima στην Ιαπωνία, η οποία παρήγαγε πίδακες λάβας ύψους περίπου

1500m. Στις τυπικές περιπτώσεις ωστόσο το ύψος τους κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως μερικές εκατοντάδες μέτρα.



**Εικόνα 17. α)** Στις 30 Δεκεμβρίου 1969, ένα σιντριβάνι λάβας πάνω από 300 μέτρα από την έκρηξη του ηφαιστείου Mauna Ulu. (USGS, Don Swanson) **β)** Κοντινή θέα σχοινώδους υψής λάβας που σχηματίστηκε στο ηφαίστειο Kilauea, Χαβάη. (T.N. Mattox, 11.06.1995)

### 3.1.1.2 Έκρηξεις τύπου Strombolian

Το είδος της ηφαιστειακής δραστηριότητας Strombolian οφείλει την ονομασία του στο ηφαίστειο Stromboli στην κάτω Ιταλία, το οποίο εκρήγνυται συνεχώς για αιώνες. Strombolian εκρήξεις δημιουργούνται από το σκάσιμο των φυσαλίδων αερίου μέσα στο μάγμα. Αυτές οι φυσαλίδες αερίου μέσα στο μάγμα συσσωρεύονται και συνενώνονται σε μεγάλες φυσαλίδες, που ονομάζονται *gas slugs*. Αυτά μεγαλώνουν αρκετά και ανέρχονται μέσα από τη στήλη της λάβας. Μόλις φτάσουν στην επιφάνεια, η διαφορά στην πίεση του αέρα προκαλεί τη φούσκα να σκάσει με ένα δυνατό θόρυβο εκτοξεύοντας μάγμα στον αέρα με έναν τρόπο παρόμοιο με μια φούσκα σαπουνι. Λόγω των υψηλών πιέσεων αερίου που συνδέεται με τις λάβες, η συνεχιζόμενη δραστηριότητα είναι γενικά της μορφής των σποραδικών δυνατών εκρήξεων διάρκειας μερικών λεπτών μεταξύ διαδοχικών γεγονότων (Mike Burton, 2007).



**Εικόνα 18.** Έκρηξη του ηφαιστείου Stromboli.

Οι εκρήξεις τύπου Strombolian χαρακτηρίζονται από εντονότερη εκρηκτικότητα σε σύγκριση με τις τύπου Hawaiian και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αναλογία πυροκλαστικών προϊόντων και βασαλτικής λάβας, η οποία τις περισσότερες φορές παρουσιάζεται κατακεραματισμένη. Οι κλίσεις του τελικού ηφαιστειακού κτίσματος είναι αρκετά έντονες (30° - 45°) (Κυριακόπουλος, 2003)

### 3.1.1.3 Εκρήξεις τύπου Vulcanian

Το μικρό νησί *Βουλκάνο* (Vulcano) ανήκει όπως και το Στρόμπολι στα Αιόλια νησιά μεταξύ Σικελίας και Ιταλίας. Οι Ρωμαίοι, βλέποντας τις λάμπεις από τις εκρήξεις, πίστευαν ότι στο νησί είχε το εργαστήριό του ο θεός της φωτιάς Vulcan, που είναι ο ομόλογος του θεού Ήφαιστου στην ελληνική μυθολογία. Από αυτόν πήρε το νησί το όνομά του και, με τη σειρά του, το έδωσε στη λέξη volcano που σημαίνει ηφαίστειο στις περισσότερες λατινογενείς γλώσσες.

Το νησί έδωσε επίσης το όνομά του σε ένα ξεχωριστό τύπο εκρήξεων, τις Vulcanian εκρήξεις (vulcanian eruptions). Οι Vulcanian εκρήξεις είναι μεμονωμένες σύντομες εκρήξεις που διαρκούν μερικά λεπτά έως μερικές ώρες και στην αρχή μοιάζουν με κανονικές εκτοξεύοντας βολίδες και λιθάρια με μεγάλη ταχύτητα. Στη συνέχεια, οι εκρήξεις είναι σχετικά ηπιότερες και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Η ηφαιστειακή δράση τύπου volcano είναι πιο εκρηκτική από αυτήν του Στρόμπολι δημιουργώντας εκρηκτικές στήλες ύψους μεταξύ 5-10 km. Ο όγκος της τέφρας που παράγεται είναι σχετικά μικρός (<1 km<sup>3</sup>) και η περιοχή διασποράς όχι πολύ μεγάλη. Σήμερα, περιοδική Vulcanian δράση έχουν τα ηφαίστεια Sakurajima (Ιαπωνία) και Tuvurvur (Παπούα Νέα Γουινέα).



**Εικόνα 19.** Vulcanian έκρηξη του ηφαιστείου Tuvurvur μέρος της Rabaul Caldera. Papua New Guinea. (Flickr)

Σε αντίθεση με τις Strombolian εκρήξεις που σχετίζονται με βασαλτικό μάγμα, οι Vulcanian σχετίζονται συχνότερα με ανδεσιτικό έως δακιτικό μάγμα. Το υψηλότερο ιξώδες αυτών των μαγμάτων εμποδίζει τη διαφυγή των αερίων και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλής πίεσης στο μάγμα και εκρηκτικότερες συνθήκες. Τα εκτινασσόμενα θραύσματα δεν έχουν το αεροδυναμικό σχήμα που είναι χαρακτηριστικό στις Strombolian εκρήξεις. Ο λόγος είναι το υψηλότερο ιξώδες του μάγματος καθώς και το ότι τα αναβλήματα ενσωματώνουν υλικό από τα πετρώματα που φράσσουν τον πόρο του ηφαιστείου. Οι εκρήξεις τύπου volcano συχνά συνδέονται με την ανάπτυξη θόλων λάβας, όπως αυτός στο ηφαίστειο Pelee (Μαρτινίκα, 1902), και με τη δημιουργία πυροκλαστικών ροών από την κατάρρευση των θόλων.

Μολονότι οι βολίδες είναι άφθονες σε κοντινές αποστάσεις από τον πόρο του ηφαιστείου, ο κύριος όγκος των πυροκλαστικών των Vulcanian εκρήξεων αποτελείται από πολύ λεπτόκοκκα υλικά στα οποία επικρατεί κυρίως η στάχτη. Η άφθονη στάχτη είναι αποτέλεσμα του έντονου θρυμματισμού που οφείλεται στο υψηλό ποσοστό αερίων του μάγματος. Ενίοτε τα αέρια αυτά προέρχονται από την εξάτμιση μετεωρικού νερού, γεγονός που οδηγεί αρκετές από τις Vulcanian εκρήξεις να είναι εν μέρει υδροηφαιστειακές. Οι αποθέσεις πτώσης της τέφρας είναι έντονα θρυμματισμένες, εντούτοις η περιοχή διασποράς τους είναι σχετικά μέτρια. Αυτό δείχνει υψηλό βαθμό εκρηκτικότητας (έντονος θρυμματισμός) με δημιουργία μέτριας εκρηκτικής στήλης (μέτρια διασπορά). (Camp, 2006)

#### 3.1.1.4 Εκρήξεις τύπου Peleean

Οι εκρήξεις τύπου Πελέ (Peleean eruptions) πήραν το όνομά τους από την κλασική έκρηξη του ηφαιστείου Πελέ (Μαρτινίκα) το 1902. Η πυροκλαστική ροή που δημιουργήθηκε από την κατάρρευση ενός αναπτυσσόμενου θόλου λάβας στην κορυφή του ηφαιστείου κατέστρεψε την πόλη St. Pierre θανατώνοντας 30.000 κατοίκους της.



**Εικόνα 20.** Η ανδεσιτικής σύστασης λάβα με την μορφή “Βελόνας ή οβελίσκου” που ανυψώθηκε μετά την τρομακτική έκρηξη του ηφαιστείου Πελέ τον Μάιο του 1902.

Οι εκρήξεις τύπου Peleean μοιάζουν με τις Plinian εκρήξεις γιατί συνδέονται με όξινα μάγματα, καθώς και με τη δημιουργία πυροκλαστικών ροών. Παράλληλα όμως

διαφέρουν στο ότι, στις εκρήξεις τύπου Peleean το μάγμα έχει χάσει τα αέρια του με αποτέλεσμα αφενός να μη θρυμματίζεται και αφετέρου να αυξάνεται ακόμη περισσότερο το ήδη υψηλό ιξώδες του, λόγω της παρουσίας του διοξειδίου του πυριτίου.

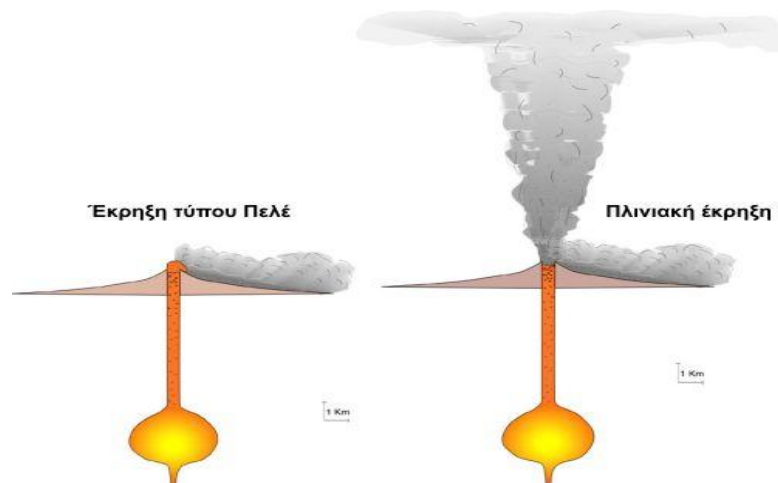
Κατά συνέπεια, το μάγμα ανέρχεται πάρα πολύ αργά (με ταχύτητες της τάξης των cm/sec) και συσσωρεύεται στον κρατήρα του ηφαιστείου σχηματίζοντας θόλους λάβας ή σχηματίζει παχύρρευστες ροές λάβας στα πλευρά του ηφαιστείου σε περίπτωση που συνεχίσει την έξοδό του. Σχηματικά μπορούμε να παρομοιάσουμε την έξοδο της λάβας με την έξοδο της οδοντόπαστας από το σωληνάριό της.

Η πολύ αργή ταχύτητα ανόδου και εξόδου του μάγματος είναι και ο λόγος που οι εκρήξεις τύπου Peleean διαρκούν περισσότερο από τις Plinian, και συγκεκριμένα χρόνους της τάξης από μερικούς μήνες έως μερικά έτη.

Παρά το γεγονός ότι το μάγμα είναι φτωχό σε αέρια όπως προαναφέρθηκε με αποτέλεσμα να αποτρέπεται ο θρυμματισμός και η δημιουργία βίαιων εκρήξεων με εκρηκτικές στήλες τύπου Plinian, ωστόσο οι θόλοι που σχηματίζονται είναι ασταθείς και μπορούν να καταρρεύσουν. Στην περίπτωση αυτή σχηματίζονται πυροκλαστικές ροές με συνέπειες εξίσου καταστροφικές με αυτές των εκρήξεων Plinian.

Η διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη πυροκλαστικών ροών είναι:

- Οι πυροκλαστικές ροές στις εκρήξεις τύπου Peleean, που ονομάζονται πυρακτωμένα νέφη (*nuee ardentes*), προκαλούνται από την κατάρρευση του θόλου λάβας και περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό από συμπαγή θραύσματα, τα οποία προήλθαν από την κατάρρευση του θόλου λάβας και έχουν διάφορα μεγέθη, από λιθάρια μέχρι ογκόλιθους.
- Οι πυροκλαστικές ροές στις Plinian εκρήξεις, που ονομάζονται ρεύματα κίσηρης (*pumice flows*), προκαλούνται από την κατάρρευση της εκρηκτικής στήλης και περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό κίσηρης που προήλθε από το θρυμματισμό του μάγματος λόγω της παρουσίας των αερίων.



Εικόνα 21. Μηχανισμοί εκρήξεως τύπου Πελέ και τύπου Plinian.

### 3.1.1.5 Εκρήξεις τύπου Plinian

Οι Πλινιακές εκρήξεις (Plinian eruptions) είναι βίαια εκρηκτικά επεισόδια που παράγουν τεράστιες στήλες τέφρας και αερίων που ανέρχονται σε ύψος μέχρι και 45km στη στρατόσφαιρα. Αυτός ο τύπος εκρήξεων πήρε το όνομά του από τον Πλίνιο το Νεότερο, ο οποίος περιέγραψε λεπτομερώς την έκρηξη του Βεζουβίου το 79 μ.Χ. Η έκρηξη δημιούργησε μία τεράστια στήλη από τέφρα, καθώς επίσης πυροκλαστικές ροές που έθασαν τις γειτονικές πόλεις Πομπηία και Ηράκλεια και έγιναν η αιτία για το θάνατο χιλιάδων ανθρώπων μεταξύ αυτών και του Πλίνιου του Πρεσβύτερου.



**Εικόνα 22.** Μια δραματοποιημένη φωτογραφία από την τελευταία μέρα της Pompeii.

Αυτές οι βίαιες Plinian εκρήξεις συνδέονται με δακτιτικά και ρυολιθικά μάγματα πλούσια σε αέρια, τα οποία εκρήγνυνται από στρωματοηφαίστεια. Η διάρκεια των εκρήξεων ποικίλει πολύ και κυμαίνεται από ώρες έως ημέρες. Οι πιο παρατεταμένες εκρήξεις συνδέονται με τα πιο όξινα μάγματα.

Εκρήξεις Plinian παρουσιάζονται και σε βασαλτικά ηφαίστεια, σε περίπτωση που η διαφοροποίηση του μάγματος δημιουργεί όξινο μάγμα στο ανώτερο τμήμα του μαγματικού θαλάμου.

Σε αντίθεση με τις Strombolian και Vulcanian εκρήξεις, οι οποίες είναι μεμονωμένες και ασυνεχείς, οι Plinian εκρήξεις σχηματίζουν συνεχείς και παρατεταμένες εκρηκτικές στήλες. Επίσης, η εκρηκτική ηφαιστειακή δράση τύπου Plinian είναι εντελώς διαφορετική από την ήπια εκχυτική ηφαιστειακή δράση τύπου Χαβάης. Αν και, οι δύο τύποι εκρήξεων μοιάζουν στο ότι παράγουν συνεχείς και παρατεταμένες εκρηκτικές στήλες, στην πρώτη περίπτωση είναι βίαιες, τεράστιες και πλούσιες σε όξινα πυροκλαστικά υλικά, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αποτελούνται από πύρινους πίδακες βασαλτικής λάβας. Ο λόγος είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις τα αέρια έχουν περίπου

τον ίδιο ρυθμό ανόδου μέσα στο μάγμα καθώς αυτό εξέρχεται από τον κεντρικό πόρο του ηφαιστείου.

Οι Plinian εκρήξεις σχηματίζουν μεγάλες εκρηκτικές στήλες, οι οποίες προωθούνται από την ενέργεια που παράγει η διαστολή των αερίων και τα μεταγωγικά ρεύματα. Η ταχύτητα εξόδου των υλικών είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο. Μερικές στήλες φτάνουν το ύψος των 45 km περίπου. Η διασπορά της τέφρας είναι μεγάλη και καλύπτει ευρείες περιοχές, όπου το πάχος των αποθέσεων κίσηρης και στάχτης είναι ομοιόμορφο. Συνήθως, η διασπορά είναι ασύμμετρη γύρω από το ηφαίστειο, καθόσον τα υλικά μεταφέρονται από τους ανέμους που επικρατούν.

Τα προϊόντα των Plinian εκρήξεων είναι κυρίως τεράστιοι όγκοι κίσηρης ( $0.5 - 50 \text{ km}^3$ ). Όμως τα καταστρεπτικότερα φαινόμενα είναι αυτά που συνοδεύουν τις Plinian εκρήξεις, όπως οι πυροκλαστικές ροές και τα λαχάρ. Όταν η εκρηκτική στήλη καταρρέυσει σχηματίζονται καυτές πυροκλαστικές ροές που κατέρχονται τις πλευρές του ηφαιστείου με τεράστια ταχύτητα. Με την προσθήκη νερού, που προέρχεται από την τήξη χιονιού ή πάγου, και την ανάμειξή του με τα πυροκλαστικά υλικά δημιουργούνται τα λεγόμενα λαχάρ, τα οποία έχουν τη συνεκτικότητα υγρού τσιμέντου και εντούτοις κινούνται στις πλαγιές με ταχύτητα χειμάρρου.

Σε μεγάλες Plinian εκρήξεις και καθώς ο μαγματικός θάλαμος κάτω από το ηφαίστειο αδειάζει, μπορεί να προκληθεί κατάρρευση του ηφαιστειακού οικοδομήματος και δημιουργία καλδέρας. (Camp, 2006)

Τυπικά παραδείγματα Plinian εκρήξεων, εκτός του Βεζουβίου που χάρισε το όνομά του στον τύπο αυτών των εκρήξεων, είναι οι εκρήξεις της Σαντορίνης περίπου το 1650 π.Χ., του Krakatau στην Ινδονησία το 1883, του ηφαιστείου Tambora στην Ινδονησία το 1815 και του Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991.



Εικόνα 23. Plinian έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991. (Clucas R)



### 3.1.2 Υδροφαιστειακές εκρήξεις

Οι υδροφαιστειακές εκρήξεις (hydrovolcanic eruptions) δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του μάγματος, είτε με υπόγειο, είτε με επιφανειακό νερό. Οι βίαιες υδροφαιστειακές εκρήξεις βασαλτικής λάβας μερικές φορές ονομάζονται και τύπου Surtsey, από το ηφαιστειακό νησί Surtsey νότια της Ισλανδίας, το οποίο δημιουργήθηκε και αναδύθηκε μέσα από τη θάλασσα το 1963 από υδροφαιστειακή δράση. Επίσης ονομάζονται και φρεατικές εκρήξεις (phreatic explosions).



**Εικόνα 24.** Η δημιουργία του νησιού Surtsey το 1963 από υδροφαιστειακή έκρηξη (<http://www.ngdc.noaa.gov> NOAA).

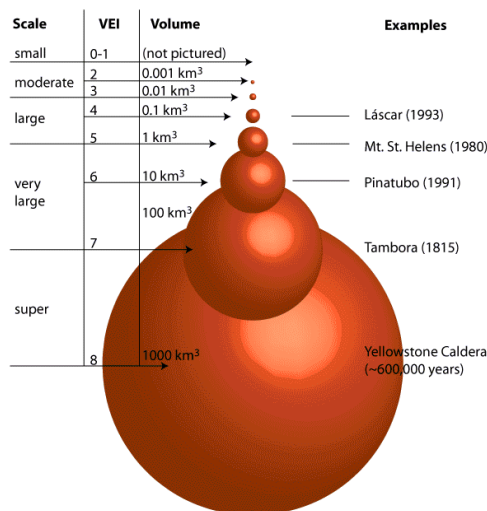
Οι υδροφαιστειακές εκρήξεις θεωρούνται ότι είναι το «υγρό» ισοδύναμο της Strombolian, αν και είναι πολύ πιο εκρηκτικές. Αυτή η υψηλή εκρηκτικότητα είναι το χαρακτηριστικό της υδροφαιστειακής δραστηριότητας. Καθώς το νερό θερμαίνεται, μετατρέπεται σε ατμό απότομα και έτσι κατακερματίζει το μάγμα σε πολύ λεπτόκοκκη στάχτη. Όταν δημιουργήθηκε το ηφαιστειακό νησί Surtsey στον Ατλαντικό, οι αρχικές υδροφαιστειακές εκρήξεις ήταν θεαματικά εκρηκτικές. Καθώς όμως προχωρούσε η ανάπτυξη του ηφαιστείου, η λάβα στον κεντρικό πόρο αντιδρούσε όλο και λιγότερο με το νερό, έτσι ώστε τα τελευταία στάδια της δράσης να είναι τύπου Strombolian.

Οι υδροφαιστειακές εκρήξεις δεν περιορίζονται μόνο σε υποθαλάσσια δημιουργία ωκεάνιων νησιών. Πολλές βίαιες υδροφαιστειακές εκρήξεις δημιουργούνται στην ξηρά από αλληλεπίδραση του βασαλτικού μάγματος με τον υδροφόρο ορίζοντα σε μικρά βάθη κάτω από την επιφάνεια. (Camp, 2006)

### 3.1.3 Δείκτης εκρηκτικότητας VEI

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος ως προς το μέγεθος και την εκρηκτικότητά τους. Στον πίνακα που ακολουθεί αναδεικνύεται ένας γενικός κανόνας που αφορά πλειάδα φυσικών φαινομένων, αλλά και τα ηφαίστεια, ως προς την κατανομή της έντασης και της συχνότητας των γεγονότων. Συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι οι μικρές εκρήξεις είναι συχνότερες από τις μεγαλύτερες εκρήξεις. Η βασική αιτία είναι ότι για να δημιουργηθούν οι απαραίτητες πιέσεις αερίου που προκαλούν τις μεγαλύτερες εκρήξεις απαιτείται ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η

παγκόσμια συχνότητα των μικρών εκρήξεων, που παράγουν 0.001 έως 0.01 km<sup>3</sup> ηφαιστειακό υλικό, είναι μια φορά κάθε λίγους μήνες, ενώ η συχνότητα πολύ μεγάλων εκρήξεων, που παράγουν χιλιάδες κυβικά χιλιόμετρα τέφρας, είναι περίπου μία φορά κάθε 100 000 έτη.



**Εικόνα 25.** Διάγραμμα που δείχνει το μέγεθος της συσχέτισης του δείκτη VEI με τον συνολικό εκτινασσόμενο όγκο.

Η τελευταία πραγματικά γιγαντιαία έκρηξη πάνω στη γη συνέβη στο ηφαιστειο Τόμπα της Σουμάτρας 74000 χρόνια πριν. Παρήγαγε περίπου 2800 km<sup>3</sup> τέφρας, πάνω από 2000 φορές το ποσό που παράχθηκε από την έκρηξη του Ορ. Αγίας Ελένης, το 1980.

**Πίνακας 1.** Δείκτης VEI, κατηγοριοποίησης και χαρακτηρισμού των ηφαιστειακών εκρήξεων

| VEI | Ύψος στήλης έκρηξης | Εκτινασσόμενος όγκος *     | Είδος έκρηξης             | Συχνότητα εκρήξεων ** | Παραδείγματα            |
|-----|---------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 0   | <100 m              | 1,000 m <sup>3</sup>       | Hawaiian                  | Συνεχόμενες           | Kilauea                 |
| 1   | 100 – 1000 m        | 10,000 m <sup>3</sup>      | Hawaiian/<br>Strombolian  | μήνες                 | Stromboli               |
| 2   | 1– 5 km             | 1,000,000 m <sup>3</sup>   | Strombolian/<br>Vulcanian | μήνες                 | Galeras (1992)          |
| 3   | 3– 15 km            | 10,000,000 m <sup>3</sup>  | Vulcanian                 | έτος                  | Nevado del Ruiz (1985)  |
| 4   | 10–25 km            | 100,000,000 m <sup>3</sup> | Vulcanian/<br>Peleeian    | μερικά έτη            | Eyjafjallajökull (2010) |
| 5   | >25 km              | 1 km <sup>3</sup>          | Plinian                   | 5–10 έτη              | Mt St.Helens (1980)     |
| 6   | >25 km              | 10 km <sup>3</sup>         | Plinian/ Ultra<br>Plinian | 1000 έτη              | Krakatau (1883)         |
| 7   | >25 km              | 100 km <sup>3</sup>        | Ultra Plinian             | 10000 έτη             | Tambora (1815)          |
| 8   | >25 km              | 1000 km <sup>3</sup>       | Ultra Plinian             | 100000 έτη            | Lake Toba (74 Ka)       |

\* Ελάχιστος εκτινασσόμενος όγκος που απαιτείται για να θεωρηθεί η έκρηξη στο πλαίσιο της κατηγορίας.  
 \*\* Κατ' εκτίμηση συχνότητα ανά κατηγορία (παρατηρούνται εξαιρέσεις).  
 † Υπάρχει μια ασυνέχεια μεταξύ του 2ου και 3ου επιπέδου VEI. Αντί της αύξησης με τάξης μεγέθους του 10, η τιμή αυξάνεται κατά ένα μέγεθος 100 (από 10.000 έως 1.000.000).  
**VEI: The Volcano Explosivity Index**  
[http://www.geology.sdsu.edu/how\\_volcanoes\\_work/index.html](http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/index.html) (Newhall, 1982)

## 3.2 Προϊόντα ηφαιστειακών εκρήξεων

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται τα προϊόντα και τα φαινόμενα που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα των ηφαιστειακών εκρήξεων. Τα προϊόντα των ηφαιστειακών εκρήξεων ποικίλουν πολύ και εξαρτώνται κυρίως από τη σύσταση του μάγματος, το ιξώδες του και την περιεκτικότητά του σε αέρια. Για παράδειγμα, οι ροές λάβας είναι συχνές κατά τις ήπιες βασαλτικές εκρήξεις, οι οποίες σχετίζονται με τα ασπιδόμορφα ηφαίστεια, τους κώνους σκωριών και τις σχισμογενείς εκρήξεις. Αντίθετα, οι πυροκλαστικές ροές, τα λαχάρ και οι τεράστιες αποθέσεις τέφρας είναι συχνές σε βίαιες ανδεσιτικές έως ρυολιθικές εκρήξεις που σχετίζονται με τα στρωματοηφαίστεια.

Τα κυριότερα προϊόντα ηφαιστειακών εκρήξεων είναι:

- Τα ηφαιστειακά αέρια
- Οι ροές λάβας
- Οι πυροκλαστικές ροές
- Τα λαχάρ
- Η τέφρα και τα πυροκλαστικά πετρώματα

Από τα ανωτέρω θα γίνει περιληπτική αναφορά στα ηφαιστειακά αέρια και στην τέφρα, τα οποία αποτελούν βασικό κίνδυνο για την εναέρια κυκλοφορία. Τα υπόλοιπα προϊόντα των ηφαιστειακών εκρήξεων αποτελούν εν δυνάμει κινδύνους των αερομεταφορών, κυρίως όμως στο χώρο των αεροδρομίων και δεν θα περιγραφούν, καθώς δεν σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο της διατριβής.

### 3.2.1 Ηφαιστειακά αέρια

Ηφαιστειακά αέρια είναι κατ' ουσία στο σύνολό τους τα γνωστά αέρια με εξαίρεση το οξυγόνο, το οποίο παράγεται από τη φωτοσύνθεση, ενώ τα υπόλοιπα αέρια έχουν προέλθει από το εσωτερικό της Γης μέσω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Στη σύνθεση του μάγματος κατά βάρος τα ηφαιστειακά αέρια καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό που κυμαίνεται στην τάξη του 1% με 5%.

| Βασικά αέρια              | Αέρια σε ίχνη | Τοξικά αέρια                   |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|
| H <sub>2</sub> O (70-90%) | N, H, S       | HCl, HF                        |
| CO <sub>2</sub>           | Cl, F         | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |
| SO <sub>2</sub>           | CO, Ar        | H <sub>2</sub> S               |

**Πίνακας 2.** Σύσταση αερίων των ηφαιστειακών εκρήξεων. (Camp, 2006)

Οι συγκεντρώσεις των διαφόρων ηφαιστειακών αερίων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από το ένα ηφαίστειο στο άλλο. Οι υδρατμοί είναι συνήθως το πιο άφθονο από ηφαιστειακά αέρια, και ακολουθείται από το διοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου. Άλλα κύρια ηφαιστειακά αέρια είναι το υδρόθειο, το υδροχλώριο και το υδροφθόριο. Ένας μεγάλος αριθμός από ίχνη αερίων βρίσκονται επίσης στις ηφαιστειακές εκπομπές, που τυπικά περιέχουν υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, αλογονάνθρακες, οργανικές ενώσεις και πτητικά μεταλλικά χλωριούχα άλατα. Τα αέρια

που εκλύονται στις ηφαιστειακές εκρήξεις παρουσιάζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες στον παραπάνω πίνακα.

Οι μεγάλες και βίαιες ηφαιστειακές εκρήξεις εκτοξεύουν υδρατμούς ( $H_2O$ ) διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ), υδροχλώριο ( $HCl$ ), υδροφθορικό οξύ ( $HF$ ) και τέφρα (σκόνη πετρωμάτων και ελαφρόπετρα) στη στρατόσφαιρα σε ύψος 16km με 32km πάνω από την επιφάνεια της Γης.

### 3.2.2 Τέφρα

Η εκρηκτική δράση των αερίων έχει ως αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του μάγματος και των πετρωμάτων. Όσο πιο εκρηκτική η ηφαιστειακή δράση τόσο πιο έντονος ο κατακερματισμός.

Τέφρα (terhra) είναι το σύνολο των πυροκλαστικών θραυσμάτων που εκτοξεύονται από τον πόρο κατά τη διάρκεια των εκρηκτικών ηφαιστειακών δράσεων. Η τέφρα αποτελείται από χαλαρά υλικά.

Τα πυροκλαστικά πετρώματα αποτελούνται από διάφορα ηφαιστειακά θραύσματα, τα οποία είναι προϊόντα της εκρηκτικής ηφαιστειακής δραστηριότητας. Τα περισσότερα από αυτά οφείλονται στις βίαιες εκρήξεις των ηφαιστειών, ορισμένα όμως προκύπτουν από το θρυμματισμό λαβών, οι οποίες είχαν ήδη στερεοποιηθεί. Συνήθως τα πετρώματα αυτά παρουσιάζουν κλαστική υφή.



**Εικόνα 26.** α) Διαστάσεις και μορφές τέφρας, β) Δείγμα τέφρας από την έκρηξη του ηφαιστείου Mount St. Helens 18.5.1980 (USGS, D. Wieprecht)

Η ταξινόμηση των πυροκλαστικών υλικών γίνεται με διάφορους τρόπους. Ανάλογα με το μέγεθος των κλασμάτων διακρίνονται σε βολίδες ( $d > 32mm$ ), λιθάρια ( $4mm < d < 32mm$ ) και ηφαιστειακή σποδό ( $d < 4mm$ ). Οι βολίδες χαρακτηρίζονται ως βόμβες, αν κατά την εκτίναξή τους στην ατμόσφαιρα ήταν εν μέρει ή εξολοκλήρου σε υγρή κατάσταση, ή ως μπλοκ, αν ήταν σε στερεά κατάσταση. Τα συμπαγή πυροκλαστικά πετρώματα, τα οποία αποτελούνται από μεσόκοκκα ως λεπτόκοκκα υλικά (λιθάρια, σποδό) χαρακτηρίζονται ως τόφφοι, ενώ τα ασύνδετα υλικά ως τέφρα. Επίσης χρησιμοποιούνται οι όροι “ηφαιστειακό κροκαλοπαγές” και “ηφαιστειακό λατυποπαγές” για συμπαγή πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από βόμβες ή μπλοκ, αντίστοιχα. Τέλος, ο όρος “τοφφίτης” χρησιμοποιείται για μείγματα πυροκλαστικών και επικλαστικών υλικών.

Από πλευράς χημικής συστάσεως οι τόφοι χαρακτηρίζονται ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, π.χ., ως ρυολιθικοί, ανδεσιτικοί, κτλ.

### 3.3 Επιπτώσεις ηφαιστειακών εκρήξεων

Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ηφαιστειακών εκρήξεων, όπως φρεάτιες εκρήξεις (ατμός που δημιουργείται από εκρήξεις), βίαιες εκρήξεις από λάβα υψηλού ιξώδους (π.χ. ρυόλιθους), διαχυτικές εκρήξεις από λάβα χαμηλού ιξώδους (π.χ. βασάλτες), πυροκλαστικών ροών, λαχάρ και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Όλες αυτές οι μορφές ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο και μπορεί να αποβούν μοιραίες.

Οι πιο σημαντικές επιπτώσεις από αυτές τις εκρήξεις προέρχονται από τη μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ), το οποίο συμπυκνώνεται γρήγορα στη στρατόσφαιρα και σχηματίζει αερολύματα θείου. Τα αερολύματα αυξάνουν το albedo της Γης, αντανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία πίσω στο διάστημα και χαμηλώνοντας κατά συνέπεια τη θερμοκρασία της τροπόσφαιρας της Γης. Αντιστοίχως, απορροφούν τη θερμότητα που εκπέμπεται από τη Γη, με αποτέλεσμα να αυξάνουν τη θερμοκρασία της στρατόσφαιρας.

Αρκετές εκρήξεις κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα έχουν προκαλέσει μείωση της μέσης θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης μέχρι και μισό βαθμό (κλίμακα Fahrenheit) για περιόδους ενός έως τριών ετών. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το διοξείδιο του θείου από την έκρηξη του ηφαιστείου Huaynarutina προκάλεσε κατά πάσα πιθανότητα το Ρωσικό λιμό του 1601 – 1603 (Davis, 2008).

Κατ' αντιστοιχία υποστηρίζεται ότι ένας τέτοιος ηφαιστειακός χειμώνας συνέβη 74000 έτη πριν από μια υπέρ-έκρηξη στο νησί Σουμάτρα της Ινδονησίας, στη θέση της σημερινής λίμνης Toba. Σύμφωνα με την θεωρία καταστροφής που ασπάζονται πολλοί ανθρωπολόγοι και αρχαιολόγοι, η έκρηξη του ηφαιστείου Toba είχε παγκόσμιες επιπτώσεις, καθώς σκότωσε τους περισσότερους από τους ανθρώπους εκείνης της εποχής και το ανθρώπινο είδος έφτασε στο χείλος της εξαφάνισης. Η επίπτωση αυτή είναι καταγεγραμμένη στην γενετική κληρονομιά όλων των ανθρώπων σήμερα. (F.J. Gathorne-Hardy, 2003)

Το 1815 η έκρηξη του Όρους Tambora δημιούργησε παγκόσμια κλιματική ανωμαλία, που έγινε γνωστή ως το “έτος χωρίς καλοκαίρι” λόγω της επίδρασης που είχε στο βόρειο ημισφαίριο (Jelle Zeilinga de Boer, 2002, p. 155). Οι γεωργικές καλλιέργειες δεν απέδωσαν, το ζωικό κεφάλαιο πέθανε σε μεγάλο μέρος του βορείου ημισφαιρίου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός από τους χειρότερους λιμούς του 19ου αιώνα. (Oppenheimer, 2003 June)

Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα προκάλεσε ή συνέβαλε κατά το τέλος της Ορδοβίσιας, Πέρμιας - Τριαδικής, κάτω Δεβόνιας περιόδου στις μαζικές εξαφανίσεις των ειδών. Οι μαζικές ηφαιστειακές εκρήξεις που δημιούργησαν τα “Siberian Traps” (βασαλτικά πλατό στην Σιβηρία), ένα από τα μεγαλύτερα γνωστά

ηφαιστειακά γεγονότα τα τελευταία 500 εκατομμύρια χρόνια, που διήρκησε για ένα περίπου εκατομμύριο χρόνια, θεωρείται ότι είναι η πιθανή αιτία για τη μεγάλη εξαφάνιση των ειδών γνωστή και ως “Great Dying” πριν από περίπου 250 εκ. έτη , η οποία υπολογίζεται ότι εξαφάνισε το 90% των ειδών της εποχής εκείνης. (Benton, 2005)

## 4 Αεροπορία και Αεροναυτιλία

### 4.1 Εξέλιξη της αεροπορίας

Η επιθυμία του ανθρώπου να επικρατήσει στον πλανήτη και να μιμηθεί τη φύση τον οδήγησαν ήδη από την εποχή της μυθολογίας και την ευρεσιτεχνία του Δαιδάλου να αναζητεί τρόπους να νικήσει τη βαρύτητα. Η συνεχής προσπάθεια έφερε την εξέλιξη από τις πρώτες ευφάνταστες εμπνεύσεις μη επανδρωμένων μηχανών που πετούσαν για μικρές αποστάσεις και σε μικρά ύψη χωρίς έλεγχο και χωρίς προώθηση, στα σύγχρονα αεροσκάφη και στα πλήρως ελεγχόμενα συστήματα αεροναυτιλίας και αερομεταφορών. Τις ανακαλύψεις ορόσημο στην ιστορία της αεροπορίας αναφέρουμε συνοπτικά στις επόμενες ενότητες.

#### 4.1.1 Μηχανές πτήσης, ανεμόπτερα, χαρταετοί και αερόστατα

Το πρώτο αντικείμενο που πέταξε σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία ήταν το 420 π.Χ., όταν ο Αρχύτας (440 – 360 π.Χ.), ένας μαθηματικός από τον Τάραντα, μαθητής του Πυθαγόρα και φίλος του Πλάτωνα, κατασκεύασε μία αυτοπροωθούμενη ιπτάμενη μηχανή. Η μηχανή ήταν ένα τεχνητό ομοίωμα περιστεριού, το οποίο με κάποιο μηχανισμό και ένα βάρος με τροχαλία, κουνούσε τα φτερά του. Για προώθηση χρησιμοποιούσε ένα μπαλόνι που ξεφουσκωνε αργά, αλλά με δύναμη από μία μικρή τρύπα. Για μπαλόνι χρησιμοποιούσε τη ουροδόχο κύστη ενός γουρουνιού. Έτσι, το πανάλαφρο ομοίωμα περιστεριού που είχε κατασκευάσει, μπορούσε να πετάει σχεδόν 200m μέχρι να ξεφουσκώσει τελείως το μπαλόνι. Αναφορές στο περιστέρι αυτό κάνει ο Λατίνος ιστορικός Aulus Gellius (Wise, 1850). Τον 3ο π.Χ. αιώνα διακρίνονται οι προσπάθειες διαφόρων Κινέζων μηχανικών για πραγματοποίηση πτήσεων με χαρταετούς, ανεμόπτερα και αερόστατα με θερμό αέρα.

Τον 9ο μ.Χ. αιώνα υπάρχει αναφορά για τον Abbas Ibn Firnas ερευνητή μηχανικό, ο οποίος εκτός των άλλων περιέργων πειραμάτων που έκανε, προσπάθησε και να πετάξει. Κάλυψε το σώμα του με πούπουλα, στερέωσε και ένα ζευγάρι πτερύγια και προσπάθησε να πετάξει από ένα ψηλό σημείο. Αυτόπτες μάρτυρες λένε ότι πέταξε μία σημαντική απόσταση, αλλά στην προσγείωση τραυματίστηκε άσχημα, γιατί δεν είχε ανακαλύψει τη χρήση της ουράς, που χρησιμοποιούν τα πουλιά ως πηδάλιο. Η μόνη πηγή που αναφέρει το γεγονός προέρχεται από τον 17ο αιώνα.

Μεταξύ 1000 και 1010 ο μοναχός Eilmer of Malmesbury κατάφερε να πετάξει περίπου 200m, χρησιμοποιώντας μία κατασκευή τύπου ανεμοπτερού, αλλά και αυτός τραυματίστηκε σοβαρά. Το γεγονός αναφέρεται στο άρθρο του Lynn White. (Lynn Townsent White, 1978). Από την Αναγέννηση μέχρι και το 18ο αιώνα ξεχωρίζουν μόνο τα σχέδια του Leonardo da Vinci για ιπτάμενες μηχανές. Το 1670 ο Francesco di Terzi δημοσίευσε μία εργασία που πρότεινε την πτήση με ένα μπαλόνι από χαλκό, κενό αέρος. Παρά το γεγονός ότι η ιδέα δεν ήταν εντελώς άστοχη, δεν είχε υπολογιστεί η πίεση του περιβάλλοντος αέρα που συνέτριψε τη σφαίρα χαλκού.

Το 1783 ήταν μία σημαντική χρονιά για την αεροπορία και ιδιαιτέρως για τα αερόστατα. Μεταξύ 4 Ιουνίου και 1 Δεκεμβρίου, πέντε αεροπορικές πρωτιές επετεύχθησαν στη Γαλλία. Ξεκίνησε στις 4 Ιουνίου με του αδελφούς Montgolfier και με ένα μη επανδρωμένο αερόστατο θερμού αέρα στην Annonay της Γαλλίας και μέχρι την 1η Δεκεμβρίου ο Jacques Charles και ο Nicolas-Louis Robert απογειώθηκαν οι ίδιοι με ένα αερόστατο υδρογόνου από το Jardin des Tuileries στο Παρίσι, ανέβηκαν σε ύψος 1800ft (550m) και μετά από μία πτήση 2 ωρών και 5 λεπτών προσγειώθηκαν σε απόσταση 36km, στο Nesles-la-Vallee. (Piccard)

Το 1856 ο Γάλλος Jean-Marie Le Bris πέταξε με ένα ανεμόπτερο, το οποίο έσυρε ένα άλογο, σε μία παραλία για απόσταση 200m και έφτασε σε ύψος 100m. Το 1866 ένας Πολωνός αγρότης, ο Jan Wnek πέταξε με ένα ανεμόπτερο από το καμπαναριό μιας εκκλησίας πάνω σε ένα λόφο, προς την κοιλάδα. Ο Wnek έκανε αρκετές πτήσεις, μεταξύ 1866 και 1869. Το 1874 ο Felix du Temple κατασκεύασε ένα μικρό μονοπλάνο από αλουμίνιο, με εκπέτασμα πτερών 13m και βάρος 80kg, το οποίο αναφέρεται ότι κατάφερε να πετάξει με δική του ισχύ, από μία χιονοδρομική πίστα, ανεμοπορώντας για λίγη ώρα επέστρεψε με ασφάλεια στο έδαφος.

#### **4.1.2 Μηχανές με έλεγχο και προώθηση**

Η δεκαετία του 1880 χαρακτηρίστηκε από έντονη δραστηριότητα σε σχέδια και κατασκευές ανεμοπτέρων εξελιγμένα σε σχέση με τις παλαιότερες προσπάθειες ως προς την ικανότητά τους να κατευθύνονται με βάση τις απαιτήσεις του χειριστή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων πτητικών μηχανών ήταν τα ανεμόπτερα των Otto Lilienthal και Octave Chanute. Ο πρώτος δημοσίευσε την έρευνά του το 1889, κατασκεύασε πολλαπλά μοντέλα ανεμοπτέρων και οι μηχανές του πλησίασαν στο σύγχρονο ανεμόπτερο. Ο δεύτερος συνέχισε την εργασία του πρώτου σχεδιάζοντας και υλοποιώντας κατασκευές οι οποίες διακρίνονταν για μεγαλύτερης ακρίβειας και αποτελεσματικότερο έλεγχο.

Το 1890 ο Clement Ader δημιούργησε ατμοκίνητη μηχανή και πραγματοποίησε πτήση 50m που αποτελεί και την πρώτη αυτοκινούμενη πτήση. Πειράματα μεγαλύτερου οικονομικού κόστους, μεγέθους μηχανής και ισχύος ανύψωσης πραγματοποίησε ο Sir Hiram Maxim, χωρίς όμως να έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα αφού στο βασικότερο πείραμά του η μηχανή του καταστράφηκε.

#### **4.1.3 Οι αδερφοί Wright στην εποχή των καινοτομιών**

Η εποχή που ακολούθησε είχε τα πρώτα αξιόπιστα αποτελέσματα σε όλες τις πτητικές μηχανές. Ο βραζιλιάνος Alberto Santos – Dumont συνδύασε αερόστατο με μηχανή εσωτερικής καύσης, ενώ ο γερμανός κόμης Ferdinand von Zeppelin ξεκίνησε την κατασκευή του πρώτου σκάφους αυτού του είδους που πήρε το όνομά του το 1899. Το πρωτότυπο σκάφος είχε μήκος 128m και τροφοδοσία από δύο μηχανές Daimler 10.6kW.

Οι αδερφοί Wright γνωστοί και ως προπάτορες της αεροπορίας, ακολούθησαν αναλυτική μέθοδο για την ανακάλυψη των αεροδυναμικών δυνάμεων και εν συνεχεία



εργάστηκαν στον πλήρη έλεγχο της πτήσης. Κατασκεύασαν αεροδυναμική σήραγγα για τον έλεγχο των σχεδίων τους όπου δοκίμασαν 200 αεροδυναμικά σχέδια πτερύγων προκειμένου να διορθώσουν τους θεωρητικούς υπολογισμούς τους για την οπισθελκούσα δύναμη και την άντωση. Με τις παραπάνω καινοτομίες την εφεύρεση του rudder (οπίσθιου πτερυγίου) για πραγματοποίηση αλλαγής πορείας και μετά τη δημιουργία πολλαπλών πρωτοτύπων πλήρους μεγέθους που δοκιμάστηκαν εξαντλητικά σε δοκιμές, κατάφεραν να πραγματοποιήσουν το πρώτο σταθερό, πλήρως ελεγχόμενο και αυτοτροφοδοτούμενο αεροσκάφος το Flyer. Η πρώτη πτήση στις 17 Δεκεμβρίου 1903 στη Β. Καρολίνα από τον Orville Wright διήρκεσε 12sec, ενώ ο αδερφός του Wilbur Wright πέταξε απόσταση 260m σε 59sec αμέσως μετά. Μετά από πολλαπλές βελτιώσεις το Flyer III πέταξε τον Οκτώβριο 1905 39km σε χρόνο 39min.

#### **4.1.4 Η Αεροπορία προ και κατά τη διάρκεια των Παγκοσμίων Πολέμων**

Η ανάπτυξη των αεροσκαφών είχε ως αποτέλεσμα την άμεση χρήση τους σε πολεμικές επιχειρήσεις. Η Ιταλία τα χρησιμοποίησε για βομβαρδισμό στόχων στον Ιταλό-Τουρκικό πόλεμο στη Συρία το 1912. Στον 1<sup>ο</sup> Παγκόσμιο πόλεμο έγινε εκτενής χρήση αεροσκαφών σε πολεμικές επιχειρήσεις τόσο από τις δυνάμεις του Άξονα όσο και από τους Συμμάχους. Την ίδια περίοδο δημιουργήθηκε και η πρώτη αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ εδάφους και αέρος για τον συντονισμό των επιχειρήσεων.

Στα χρόνια μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου πολέμου υπήρξε έντονη ανάπτυξη της τεχνολογίας των αεροσκαφών, τα οποία από ξύλινα διπλάνα χαμηλής ισχύος, μετατράπηκαν σε μονοπλάνα από αλουμίνιο με τροφοδότηση υψηλής ισχύος. Η περίοδος μεταξύ 1918 και 1939 θεωρείται η χρυσή εποχή της Αεροπορίας, οπότε και η κάλυψη μεγάλων αποστάσεων έλαβε τη μορφή διαγωνισμών. Το 1927 ο Charles Lindbergh έλαβε βραβείο για την πρώτη πτήση πάνω από τον Ατλαντικό χωρίς ενδιάμεση στάση. Ένα χρόνο αργότερα ο Charles Kingsford Smith πραγματοποίησε την πρώτη πτήση πάνω από τον Ειρηνικό σε τρία στάδια με διάρκεια 28h, 35h και 20h αντίστοιχα. Το ταξίδι Okland-Hawaii- Suva(Fiji)-Brisbane αντιστοιχούσε σε 7400miles πτήσης. Ο ίδιος το 1929 συνέχισε το ταξίδι του πραγματοποιώντας τον περίπλου της γης για πρώτη φορά στην Ιστορία.

Η ίδια χρονιά χαρακτηρίστηκε από δύο σημαντικές εξελίξεις στην πολιτική αεροπορία. Το 1929 ο Jimmy Doolittle εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια της ενόργανης πτήσης, ενώ πραγματοποιήθηκε και η πτήση του μεγαλύτερου αεροσκάφους που είχε έως τότε κατασκευαστεί (Dornier Do X) το οποίο μετέφερε 169 επιβάτες, επίτευγμα το οποίο δεν καταρρίφθηκε για τα επόμενα 20 έτη. Τη δεκαετία του 1930 ξεκίνησε η ανάπτυξη της αεροπροώθησης με την προσπάθεια ανάπτυξης μηχανών jet από τη Γερμανία και την Αγγλία. Οι συγκεκριμένες προσπάθειες ευοδώθηκαν στο τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου.

#### **4.1.5 Η μεταπολεμική ανάπτυξη της Πολιτικής Αεροπορίας**

Η Πολιτική Αεροπορία αναπτύχθηκε αμέσως μετά το τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου με τη χρήση πρώην πολεμικών αεροσκαφών. Η τάση αυτή επιταχύνθηκε

ιδιαίτερος λόγω της αφθονίας βαρέων και υπερβαρέων αεροσκαφών όπως το B29 και το Lancaster που μπορούσαν να μετατραπούν σε πολιτικά αεροσκάφη.

Την εποχή του Ψυχρού πολέμου και συγκεκριμένα το Σεπτέμβριο του 1956 η Aeroflot της ΕΣΣΔ ήταν η πρώτη εταιρεία αερομεταφορών που πρόσφερε τακτικά δρομολόγια με το Tupolev TU-104. Το αντίπαλο δέος με το Boeing 707 καθιέρωσε νέα επίπεδα ασφάλειας και άνεσης για τους επιβάτες. Αρκετά νωρίτερα, το 1947, ο Chuck Yeager έσπασε για πρώτη φορά το φράγμα του ήχου με το Bell X-1 που χρησιμοποιούσε πυραυλοκίνηση. Στη συνέχεια με τη βελτίωση των υλικών και την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την κατάκτηση του διαστήματος, οι ταχύτητες που αναπτύχθηκαν ξεπέρασαν κάθε προσδοκία και έφτασαν ενδεικτικά το X-15 να αγγίζει τα 6.1mach.

Το 1969 η Boeing παρουσίασε το Boeing 747 και το Concorde της γαλλικής Aerospatiale πραγματοποίησε το πρώτο του ταξίδι. Το μεν πρώτο ήταν το μεγαλύτερο εμπορικό επιβατικό αεροσκάφος μέχρι την πρόσφατη παρουσίαση του A380, το δε δεύτερο είχε την πρωτοκαθεδρία στις υπερατλαντικές υπερηχητικές πτήσεις και έγινε το σύμβολο της γλιδής, αποφέροντας κέρδη στις εταιρίες British Airways και της Air France που το λειτουργούσαν έως πρόσφατα πριν την οριστική του απόσυρση.

Η ανάπτυξη ευφυών συστημάτων διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας στηριζόμενα σε συστήματα επιτήρησης (Radar) είναι ο ένας άξονας ανάπτυξης της αεροπορίας, ενώ στον αντίποδα η κατασκευή μη επανδρωμένων πτητικών μηχανών (UAV) για ειδικού τύπου εφαρμογές κερδίζει έδαφος.

Η σύγχρονη ιστορία με τα αποτελέσματα των επιθέσεων της 11<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου στις ΗΠΑ και τα αποτελέσματα της έκρηξης του ηφαιστείου Eyjafjallajokull, έκανε σαφές ότι απαιτείται η αύξηση των επιπέδων ασφάλειας και της άνεσης στις αερομεταφορές, σε συνδυασμό πάντα με την περιβαλλοντική ευαισθησία. Η Αεροπορία φαίνεται να περνά οριστικά από τα στάδια του ανταγωνισμού για την επίδειξη ισχύος και πλούτου στο στάδιο της λειτουργικής αυτοματοποίησης μεγάλης κλίμακας με στόχο τον πλήρη έλεγχο και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που υπεισέρχονται λόγω του ανθρώπινου παράγοντα και αποτέλεσμα την ασφαλή και ταχεία μετακίνηση ανά την υφήλιο.

## 4.2 Αεροπορικές έννοιες

Στην παρούσα ενότητα θα αναφέρουμε και θα περιγράψουμε συνοπτικά θεμελιώδεις αεροπορικές έννοιες και ειδικότερα ορολογία της αεροναυτιλίας που είναι απαραίτητες για την κατανόηση και ανάλυση που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες (ICAO\_Annex2, July 2005)

**Air Traffic Control Service:** Μια υπηρεσία που παρέχεται για τον σκοπό της:

α) πρόληψης των συγκρούσεων

1) μεταξύ αεροσκαφών, και

2) στην περιοχή ελιγμών μεταξύ αεροσκαφών και εμποδίων, και

β) διεκπεραίωσης και διατήρησης της ροής της εναέριας κυκλοφορίας.

**Air Traffic Management:** Το σύνολο των εναέριων λειτουργιών και των λειτουργιών εδάφους (υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας, διαχείριση του εναέριου χώρου και της ροής της εναέριας κυκλοφορίας) που απαιτούνται για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής διακίνησης των αεροσκαφών σε όλες τις φάσεις των λειτουργιών.

**Flight plan:** Καθορισμένες πληροφορίες που παρέχονται στις υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας και σχετίζονται με μια σχεδιαζόμενη πτήση ή τμήμα της πτήσης ενός αεροσκάφους.

**Meteorological information:** Μετεωρολογική έκθεση, ανάλυση, πρόγνωση, καθώς και κάθε άλλη δήλωση σχετικά με υφιστάμενες ή αναμενόμενες μετεωρολογικές συνθήκες.

**NOTAM (Notice To Air Men):** Μια ανακοίνωση-οδηγία η οποία διανέμεται με τηλεπικοινωνιακά μέσα και περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία υπό όρους ή την αλλαγή σε αεροναυτικό τομέα ή την εγκατάσταση νέου Συστήματος Πλοήγησης και γενικά την οποιαδήποτε εκτροπή από την κανονική λειτουργία των συστημάτων και τις προκαθορισμένες πτητικές διαδικασίες λόγω τεχνικού ή φυσικού κινδύνου. Η έγκαιρη γνώση των ανωτέρω πληροφοριών είναι ουσιαστικής σημασίας για το προσωπικό που ασχολείται με τις πτητικές λειτουργίες.

**Flight Information Region (FIR):** Ένας εναέριος χώρος καθορισμένων διαστάσεων εντός, του οποίου παρέχονται υπηρεσίες πληροφοριών πτήσεων και υπηρεσίες ετοιμότητας.

**VFR flight.** Μια πτήση που πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κανόνες πτήσης εξ όψεως, με την προϋπόθεση της ύπαρξης κατάλληλων εξ' όψεως μετεωρολογικών συνθηκών. Οι προς αξιολόγηση μετεωρολογικές συνθήκες αφορούν την ορατότητα, την απόσταση από τα σύννεφα, και με ανώτατο όριο, ίσο ή καλύτερο από τα ελάχιστα όρια που καθορίζονται.

**IFR flight.** Μια πτήση που διενεργείται σύμφωνα με κανόνες πτήσης με τη χρήση οργάνων πτήσης και γενικότερα ενόργανων διαδικασιών.

### 4.3 Σύγχρονη πλοήγηση ακριβείας

Η εξέλιξη της αεροναυτιλίας στηρίζεται στην ταυτόχρονη ανάπτυξη της τεχνολογίας των αεροσκαφών τόσο από πλευράς πτητικής ικανότητας όσο και από πλευράς συστημάτων υποστήριξης και στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων αεροναυτιλίας που υποστηρίζουν την πτήση από το έδαφος. Στην ενότητα αυτή θα αναφέρουμε συνοπτικά μερικά σημεία κομβικής σημασίας που αφορούν την πλοήγηση ακριβείας με τη χρήση δορυφόρων που αναπτύσσεται ερευνητικά αρκετά χρόνια και πλέον έχει αρχίσει να υιοθετείται στην πράξη με την εφαρμογή της σε επιχειρησιακά συστήματα διαχείρισης εναέριας κυκλοφορίας.

### 4.3.1 Συστήματα GPS και GNSS

#### 4.3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά και αρχές λειτουργίας

Στον αντίποδα της συμβατικής αεροναυτιλίας όπου υπηρεσίες Επικοινωνιών, Πλοήγησης και Επιτήρησης (Communication, Navigation, Surveillance – CNS) παρέχονται στα αεροσκάφη αποκλειστικά από σταθμούς εδάφους, η ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών και δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης παρέχει τη σύγχρονη εναλλακτική λύση. Με βάση τα νέα δεδομένα της αεροναυτιλίας το Global Navigation Satellite System (GNSS) αποτελεί τη μελλοντική λύση για την εξυπηρέτηση των αεροσκαφών ως προς το νευραλγικό τομέα της πλοήγησης. Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε θεμελιώδη στοιχεία που αφορούν την σύγχρονη πλοήγηση, ώστε στη συνέχεια να την αναδείξουμε ως παράγοντα άμβλυνσης των προβλημάτων που δημιουργούνται στην αεροναυτιλία λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

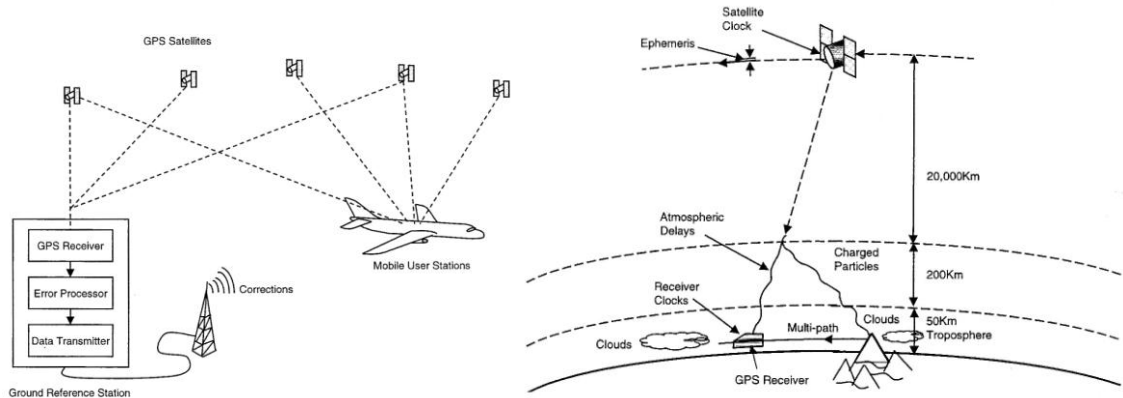
Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της αεροναυτιλίας η αεροναυτική πληροφορία όφειλε να έχει υψηλού επιπέδου προδιαγραφές και χαρακτηριστικά μεταξύ των οποίων τα σημαντικότερα είναι

- *Accuracy* – Η διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης θέσης και της πραγματικής θέσης, σε συνθήκες άνευ σφαλμάτων, είναι ο ορισμός της απαιτούμενης ακρίβειας.
- *Integrity* – Η ικανότητα παροχής έγκαιρης προειδοποιητικής πληροφορίας όταν το σύστημα δεν είναι ασφαλές για χρήση, ορίζει την απαιτούμενη ακεραιότητας.
- *Continuity* – Η ικανότητα του συστήματος πλοήγησης να παρέχει υπηρεσίες χωρίς διακοπή κατά τη διάρκεια που απαιτείται από τις διαδικασίες, είναι η συνέχεια στη λειτουργία που απαιτείται.
- *Availability* – Το μέτρο της οικονομίας ή της αποδοτικότητας του συστήματος εκφραζόμενο ως κλάσμα χρόνου είναι η απαιτούμενη διαθεσιμότητα.

Ο συνδυασμός των παραπάνω ιδιοτήτων της αεροναυτιλιακής πληροφορίας και των διαδικασιών διατηρούν το επίπεδο της ασφάλειας των πτήσεων (safety) σε υψηλά επίπεδα. Ανεξάρτητα της εξέλιξης της τεχνολογίας το επίπεδο ασφάλειας πρέπει να παραμένει σταθερό ή να βελτιώνεται. Ο τομέας αυτός παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς το GNSS, καθώς δεν στηρίζεται μόνο σε επίγειους σταθμούς, όπως γίνεται σε εγκαταστάσεις Ραδιοβοηθημάτων, αλλά και σε δορυφορικές επικοινωνίες.

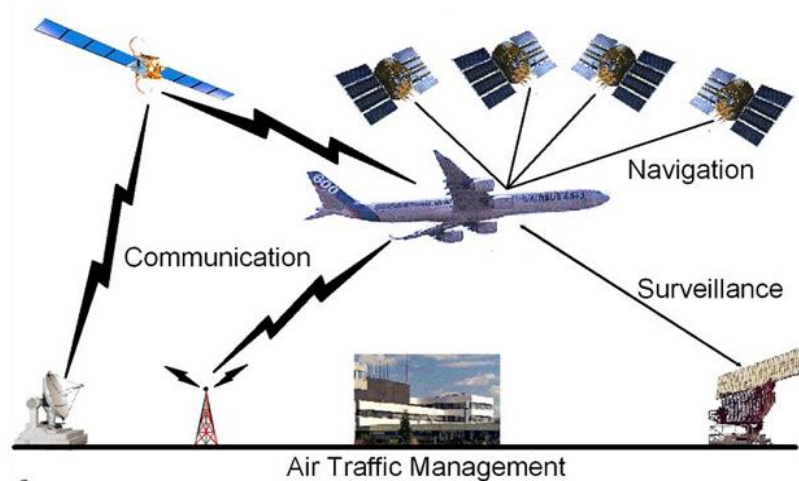
Το GNSS αποτελεί το σύστημα που συνδυάζει δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης και συγκεκριμένα το Αμερικανικό GPS, το Ρώσικο Glonass και το ευρωπαϊκό Galileo, με γεωστατικούς δορυφόρους επικοινωνιών, ώστε να παρέχει πρόσθετες εμπλουτισμένες πληροφορίες θέσης και να διασφαλίσει ακρίβεια, ακεραιότητα και κάλυψη σε επίπεδα ασφάλειας αποδεκτά για αεροναυτιλία. Η βασικότερη ιδέα που χρησιμοποιεί το GNSS είναι αυτή του DGPS που στηρίζεται στο γεγονός ότι τα λάθη που παρουσιάζονται σε δύο δέκτες που παρακολουθούν ένα δορυφόρο από κοντινές μεταξύ τους τοποθεσίες θα είναι σε γενικές γραμμές κοινά. Η αρχή λειτουργίας του DGPS φαίνεται στην Εικόνα 27α. Η θέση του σταθμού αναφοράς είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια. Με βάση αυτή υπολογίζονται με μεγάλη ακρίβεια τα σφάλματα και οι

παράμετροι διόρθωσης εκπέμπονται στους δέκτες του χρήστη μέσω radio link. Τα βασικά σφάλματα του συστήματος GPS που διορθώνονται με το GNSS παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 27β ακολούθως.



Εικόνα 27. α) Η βασική αρχή λειτουργίας του DGPS, β) Οι πηγές σφαλμάτων του GPS

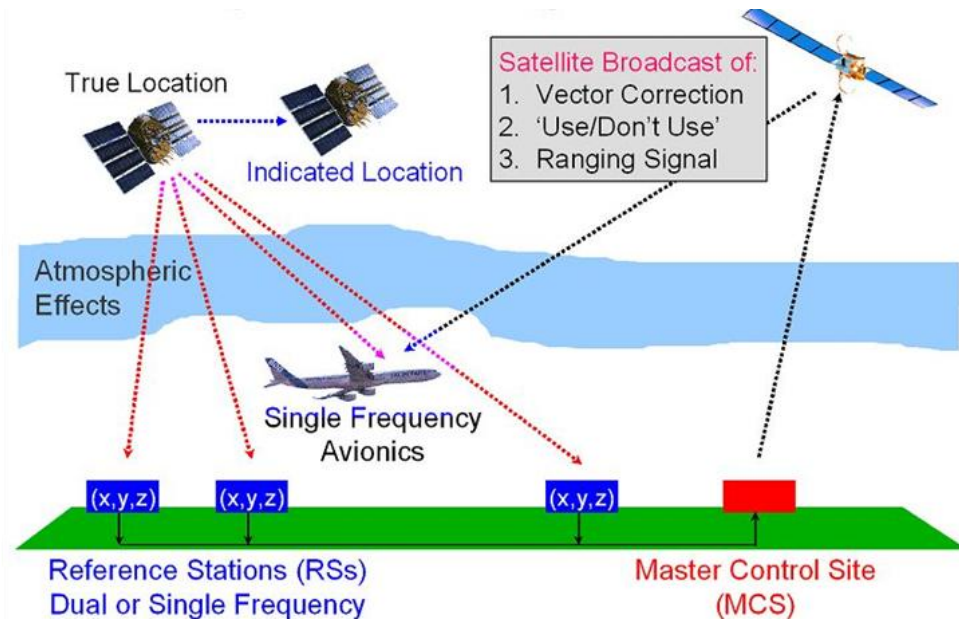
Το GNSS όπως είναι εμφανές φιλοδοξεί να αποτελέσει το πρωτεύον και μοναδικό σύστημα πλοήγησης (Navigation) στον 21ο αιώνα σύμφωνα με το βασικό επιχειρησιακό σχέδιο του ICAO για CNS/ATM (Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management) το οποίο σχηματικά παριστάνεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28. Συστήματα του μέλλοντος για υπηρεσίες CNS/ATM σύμφωνα με το πλάνο του ICAO

Οι en-route διαδικασίες μπορούν να υποστηριχθούν από τα συστήματα που αποτελούν τα Space Based Augmentation Systems (SBAS) και είναι το EGNOS για την Ευρώπη, το MSAS για την Ιαπωνία και το WAAS για την Αμερική. Το επίγειο δίκτυο υποστήριξης υπολογίζει και μεταδίδει δεδομένα διόρθωσης και ακεραιότητας GNSS στα αεροσκάφη καθώς και πληροφορία εμβέλειας. Το επίγειο αυτό δίκτυο περιλαμβάνει ομοιόμορφα γεωγραφικά κατανομημένους επίγειους GNSS δέκτες σε θέσεις αναφοράς καθορισμένες με μεγάλη ακρίβεια. Οι δέκτες που παρακολουθούν μόνιμα τους δορυφόρους GNSS ονομάζονται σταθμοί αναφοράς Reference Stations

(RS). Οι RS στέλνουν τις μετρήσεις GNSS στον MasterControl Station (MCS) ακολουθώντας τη λογική που φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29. Το λειτουργικό διάγραμμα ενός SBAS συστήματος

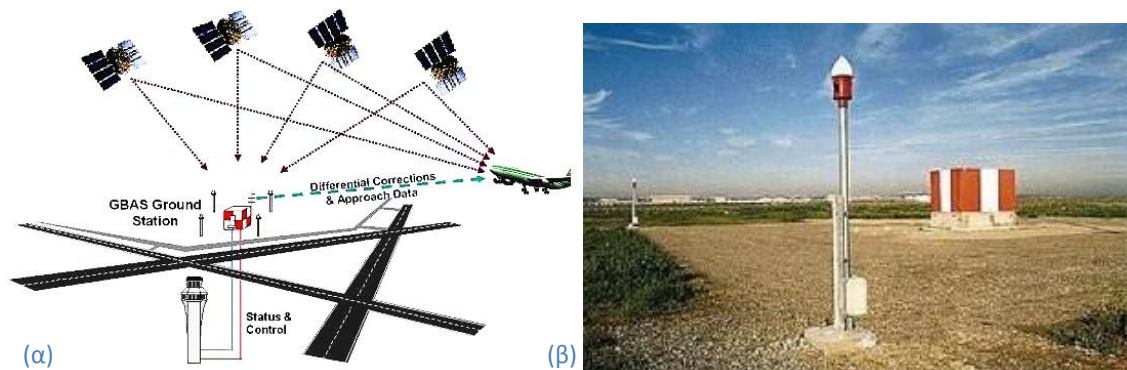
Ο Master Control Station (MCS) επεξεργάζεται τις ληφθείσες μετρήσεις από τα Reference Stations για να υπολογίσει τις τέσσερις παραμέτρους διόρθωσης για κάθε υπό παρακολούθηση δορυφόρο, δηλαδή μία παράμετρο διόρθωσης για το ρολόι του δορυφόρου και τρεις παραμέτρους για τη θέση του δορυφόρου.

#### 4.3.1.2 Πλεονεκτήματα δορυφορικής πλοήγησης και πλοήγησης ακριβείας

Ο στόχος του ICAO είναι η πλήρης μετάβαση στο GNSS για όλες τις φάσεις της πτήσεως, κατεύθυνση που επιβεβαιώθηκε στο 11ο συνέδριο της Air Navigation Commission το 2003 (ICAO\_Doc9849, 2005). Το GBAS αποτελεί την αναβάθμιση του GNSS μέσω τοπικής βελτίωσης, ώστε να παρέχεται υποστήριξη διαδικασιών ακριβείας για όλες τις κατηγορίες προσέγγισης, καθώς και σε προσγειώσεις, σε απογειώσεις, σε κινήσεις στην επιφάνεια του διαδρόμου αλλά και επιτήρηση διαδικασιών στην τερματική περιοχή σε αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος ILS. Το GBAS όπως και το GNSS πέραν του οικονομικού κέρδους που εξασφαλίζουν για την αεροναυτιλία επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια έναντι των συμβατικών συστημάτων.

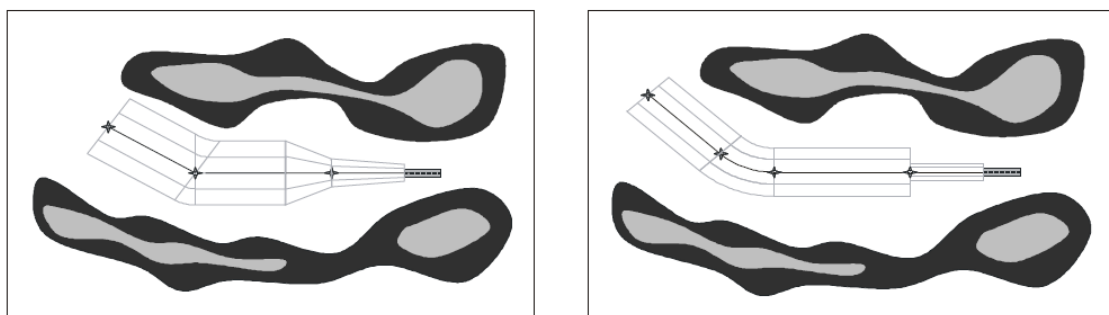
Συγκεκριμένα το GBAS επιτρέπει 4D καθοδήγηση των αεροσκαφών στην τερματική περιοχή καθώς επίσης και τη δημιουργία μεταβλητών Glide Slopes και διαφορετικών ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους και το είδος της διαδικασίας. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της χωρητικότητας, η αποσυμφόρηση του εναερίου χώρου, η αποφυγή εμποδίων κοντά στα αεροδρόμια (ορεινοί όγκοι, κτίρια κλπ) υπό φυσιολογικές συνθήκες, αλλά και η πλοήγηση στα όρια νεφών ηφαιστειακής τέφρας με ακρίβεια και ο επαναπροσδιορισμός αεροδιαδρόμων με ευελιξία σε περιόδους κρίσης μετά από ηφαιστειακή έκρηξη.

Το GBAS επιτρέπει τον καθορισμό διαφορετικών touch down points, έτσι ώστε το σύστημα να επιτρέπει την αλλαγή κατωφλίου σε περίπτωση εργασιών συντήρησης του διαδρόμου μετά από κάλυψή του από ηφαιστειακή τέφρα ή ακόμα και λόγω των προβλημάτων πέδησης που οφείλονται στο ίδιο γεγονός, όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια, χωρίς την επανεγκατάσταση και ρύθμιση του συστήματος. Το GBAS μπορεί να υποστηρίξει διαδικασίες Precision Approach για 23NM απόσταση υπερδιπλάσια σε σχέση με τα 10NM που υποστηρίζει το ILS. Υποστηρίζει επίσης και διαδικασίες απογείωσης με χαμηλή ορατότητα, ικανότητα που δεν έχει το ILS.



**Εικόνα 30. α)** Σχηματική αναπαράσταση της εγκατάστασης και της λειτουργίας του συστήματος GBAS, **β)** Φωτογραφία από εγκατάσταση πειραματικού συστήματος GBAS

Η πλοήγηση ακριβείας βασισμένη σε κριτήρια επίδοσης (Performance Based Navigation – PBN), (ICAO\_Doc9613, 2008) περιλαμβάνει τα δορυφορικά συστήματα που αναλύσαμε παραπάνω, αλλά και συμβατικά συστήματα αεροναυτιλίας που συνδυάζονται με στόχο την εξασφάλιση της ακριβέστερης και συντομότερης διαδρομής για τα αεροσκάφη από την αφετηρία ως προς τον προορισμό τους. Οι διαδικασίες ενόργανης πλοήγησης σχεδιάζονται στην περίπτωση αυτή με μικρότερα minima, δηλαδή το αεροσκάφος πετάει με μεγαλύτερη ακρίβεια και επομένως αποκλίνει ελάχιστα από την ιδανική διαδρομή, η οποία εξάλλου μπορεί να τροποποιείται δυναμικά καθώς δεν στηρίζεται σε σταθερά σημεία όπως στη συμβατική αεροναυτιλία.



**Εικόνα 31. α)** Διαδικασία συμβατικής πλοήγησης, **β)** Διαδικασία PBN (ICAO\_Doc9613, 2008)

Η βασική ιδέα του PBN ως προς την επιχειρησιακή του αξία φαίνεται σαφώς στην ακόλουθη εικόνα όπου παρουσιάζεται αρχικά η τυπική διαδικασία πλοήγησης που στηρίζεται σε συμβατικά συστήματα αεροναυτιλίας και εν συνεχεία η διαδικασία PBN. Παρατηρούμε ότι η δεύτερη διαδικασία επιτρέπει σαφώς το διαχωρισμό της

διαδικασίας και κατ' επέκταση του αεροσκάφους από τα εμπόδια. Προφανώς στη θέση των ορεινών όγκων θα μπορούσαν να είναι δύο επικίνδυνα τμήματα ηφαιστειακού νέφους τα οποία το αεροσκάφος θα έπρεπε να αποφύγει περνώντας στην περιοχή μεταξύ τους όπου υπάρχει ασφάλεια.

Η διατήρηση σταθερού σφάλματος θέσης καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης και η αντιμετώπιση του προβλήματος light-house effect που παρουσιάζουν όλα τα συστήματα πληροφορίας αζιμουθίου της συμβατικής πλοήγησης σε συνδυασμό με το δυναμικό χαρακτήρα της σχεδίασης διαδικασιών (π.χ. διαδικασία Offset) είναι τα βασικά πλεονεκτήματα της πλοήγησης με GNSS και PBN που μπορούν να αυξήσουν τη χωρητικότητα του εναερίου χώρου σε φυσιολογικές συνθήκες και να αποτρέψουν την παύση των πτήσεων σε περιόδους ηφαιστειακής κρίσης, επιτρέποντας στα αεροσκάφη να πλοηγούνται στα όρια των νεφών με ασφάλεια.

#### 4.4 Αεροπορικοί κίνδυνοι (Hazards)

Η ασφάλεια στην παροχή υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας και κατ' επέκταση στο σύνολο των λειτουργιών που αφορούν το πτητικό έργο είναι το πρώτο και σημαντικότερο ζητούμενο, γεγονός που εξηγεί την δημιουργία διεθνών οργανισμών που έχουν ως πρώτο μέλημα τη διασφάλιση αεροναυτιλιακών και αεροπορικών υπηρεσιών μέγιστης ασφάλειας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες ο οργανισμός που ασχολείται με θέματα ασφάλειας εναέριας κυκλοφορίας ονομάζεται Federal Aviation Agency (FAA, 1958), ενώ στην Ευρώπη με την ασφάλεια για τις αεροπορικές εταιρίες και τους παρόχους υπηρεσιών αεροναυτιλίας ελέγχει και πιστοποιεί ο οργανισμός European Aviation Safety Agency (EASA, 2002) και το Eurocontrol που επικεντρώνεται στην ασφάλεια των υπηρεσιών αεροναυτιλίας (Eurocontrol, 1963). Ο Διεθνής οργανισμός για την πολιτική αεροπορία ονομάζεται International Civil Aviation Organization (ICAO, 1944) και διασφαλίζει τα υψηλά επίπεδα ασφάλειας της εναέριας κυκλοφορίας διεθνώς.

Η ασφάλεια εξ' ορισμού είναι η ελαχιστοποίηση των κινδύνων που υπεισέρχονται στο αεροπορικό έργο. Ο όρος κίνδυνος (Hazard) εξειδικεύεται ως ακολούθως αναφορικά με την αεροναυτιλία.

**Κίνδυνος (Hazard)** ορίζεται μια κατάσταση ή ένα αντικείμενο που έχει δυνατότητα να προκαλέσει τραυματισμούς στο προσωπικό, βλάβη στους εξοπλισμούς ή στις υποδομές, απώλεια υλικού ή τη μείωση της ικανότητάς του να εκτελεί προκαθορισμένες λειτουργίες. (ICAO\_Doc9859, 2009)

Οι κίνδυνοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- τους φυσικούς κινδύνους,
- τους τεχνολογικούς κινδύνους
- και τους οικονομικούς κινδύνους

Οι **Φυσικοί κίνδυνοι** είναι συνέπεια του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι ενέργειες που σχετίζονται με την παροχή των υπηρεσιών.



Παραδείγματα φυσικών κινδύνων περιλαμβάνουν τα εξής:

- ακραία καιρικά ή κλιματικά φαινόμενα (π.χ. τυφώνες, χειμερινές καταιγίδες, ξηρασίες, ριπές ανέμων)
- δυσμενείς καιρικές συνθήκες (π.χ. παγοποίηση, δυνατή βροχή, χιόνι, άνεμοι και περιορισμοί στην ορατότητα)
- γεωφυσικά γεγονότα (π.χ. σεισμοί, εκρήξεις ηφαιστείων, τσουνάμι, πλημμύρες και κατολισθήσεις)
- γεωγραφικές συνθήκες (π.χ. κακοτράχαλο έδαφος ή μεγάλες ποσότητες νερού)
- περιβαλλοντικές εκδηλώσεις (π.χ. δασικές πυρκαγιές, παρουσία αγρίων ζώων, πτηνών και εντόμων ή προσβολή από επιβλαβείς οργανισμούς)
- συμβάντα δημόσιας υγείας (π.χ. επιδημίες γρίπης ή άλλων ασθενειών)

Οι **Τεχνολογικοί κίνδυνοι** είναι αποτέλεσμα αστοχίας των πηγών ενέργειας (ηλεκτρισμός, καύσιμα, υδραυλική πίεση, πίεση αέρα κλπ) ή αστοχίας κρίσιμων για την ασφάλεια λειτουργιών (αστοχίες υλικού, δυσλειτουργίες λογισμικού, προειδοποιήσεις κλπ) που είναι αναγκαίες για τις εργασίες που σχετίζονται με την παροχή των υπηρεσιών.

Παραδείγματα τεχνολογικών κινδύνων περιλαμβάνουν ανεπάρκειες όσον αφορά:

- τα αεροσκάφη και τα εξαρτήματα αεροσκαφών, τα συστήματα, τα υποσυστήματα και το συναφή εξοπλισμό
- τις εγκαταστάσεις ενός οργανισμού, τα εργαλεία και το συναφή εξοπλισμό
- τις εγκαταστάσεις, τα συστήματα, τα υποσυστήματα και το συναφή εξοπλισμό εξωτερικών οργανισμών που σχετίζονται εμμέσως με την παροχή υπηρεσιών αεροναυτιλίας

Οι **Οικονομικοί κίνδυνοι** είναι οι επιπτώσεις του κοινωνικοπολιτικού περιβάλλοντος, εντός του οποίου λαμβάνουν χώρα πράξεις σχετικές με την παροχή των υπηρεσιών αεροναυτιλίας.

Παραδείγματα οικονομικών κινδύνων περιλαμβάνουν:

- την ανάπτυξη
- την ύφεση
- το κόστος και τις συνθήκες εργασίας
- το κόστος των υλικών ή του εξοπλισμού

Οι κίνδυνοι που αναφέρονται παραπάνω αναλύονται και αντιμετωπίζονται από τους φορείς παροχής υπηρεσιών αεροναυτιλίας με την υιοθέτηση συστημάτων διαχείρισης της ασφάλειας (Safety Management System).

## 5 Ηφαιστειογενείς κίνδυνοι στην Αεροπορία

Στην κατηγοριοποίηση των βασικών κινδύνων για το αεροπορικό έργο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, έγινε αναφορά στο φυσικό κίνδυνο για την εναέρια κυκλοφορία που αφορά τις εκρήξεις ηφαιστειών. Ο κίνδυνος από τις ηφαιστειακές εκρήξεις είναι διττός, αφενός για τα αεροδρόμια που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το ηφαίστειο, αφετέρου για την εναέρια κυκλοφορία, που διέρχεται από αεροδιαδρόμους εντός ηφαιστειακού νέφους τέφρας.

Τα ηφαίστεια απειλούν με τη λάβα τους και τα πυροκλαστικά τους προϊόντα, αλλά και με την ηφαιστειακή τέφρα τα αεροδρόμια που γειτνιάζουν με τις ηφαιστειογενείς περιοχές.

Σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η ανάπτυξη αεροδρομίου σε περιοχή κοντά σε ηφαίστειο πραγματοποιείται μελέτη σκοπιμότητας για την ανάπτυξη υποδομών και λαμβάνεται απόφαση εφόσον αξιολογηθούν πιθανές εναλλακτικές μορφές εξυπηρέτησης των μετακινήσεων, εναλλακτικές θέσεις δημιουργίας αεροδρομίου σε ασφαλέστερο περιβάλλον, συχνότητα, είδος και σφοδρότητα των εκρήξεων του ηφαιστείου. Η αποτίμηση των παραπάνω στοιχείων είναι ιδιαίτερος απαιτητική διαδικασία και ενέχει κινδύνους από μη ακριβείς προβλέψεις και επομένως υψηλό ρίσκο. Δεδομένου όμως ότι δεν είναι πάντα εφικτές εναλλακτικές λύσεις, οι επενδύσεις πραγματοποιούνται με την ενίσχυση της ασφάλειας για γρήγορη και αποτελεσματική δράση στην περίπτωση επαλήθευσης δυσμενών γεγονότων.

**Πίνακας 3.** Ηφαιστειακά προϊόντα και επιπτώσεις στο αεροπορικό έργο (Berbente, 2011).

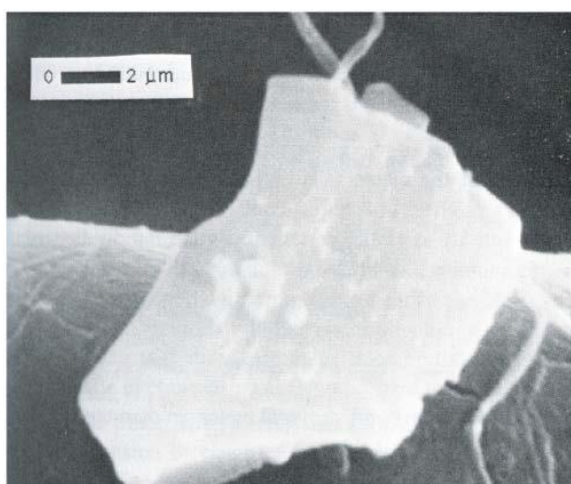
| Φυσική κατάσταση  | Όνομα  | Χαρακτηριστικές διαστάσεις | Επιπτώσεις στην αεροπορική ασφάλεια                              | Επιπτώσεις στην αεροπορική λειτουργία |
|---|--|----------------------------|--|---------------------------------------|
| Αέρια   | Ηφαιστειακά αέρια  |                            | Έλλειψη οξυγόνου για τα αεροσκάφη στην περιοχή της έκρηξης (VPE) | Διάβρωση                              |
| Ρευστά  | Λάβα   |                            | Αεροδρόμια σε γειτνίαση (VPE)                                    | δε σχετίζεται                         |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Θραυσματοειδής (aa)</li> <li>○ Σχονόμορφη (rahoehoe)</li> </ul> |                            |  |                                       |
| Στερεά  | Πτώση ηφαιστειακών προϊόντων   |                            |  |                                       |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ηφαιστειακή σκόνη</li> </ul>                                    | <1/16 mm                   | Εκτεταμένες περιοχές (VDC)                                       | Φθορές & Διάβρωση                     |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ηφαιστειακή στάχτη</li> </ul>                                   | 1/16 mm- 2 mm              | Περιορισμένες περιοχές (VAC)                                     | Φθορές & Διάβρωση                     |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Λιθάρια</li> </ul>  | 2-64 mm                    | Τοπικά (VPE)   | δε σχετίζεται                         |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Βόμβες και μύδροι</li> </ul>                                    | >64 mm                     | Τοπικά (VPE)   | δε σχετίζεται                         |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Πυροκλαστικές ροές</li> </ul>                                   | Ροές θερμών αερίων         | Αεροδρόμια σε γειτνίαση (VPE)                                    | δε σχετίζεται                         |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Λαχάρ</li> </ul>  | Ροές λάσπης                | Αεροδρόμια σε γειτνίαση (VPE)                                    | δε σχετίζεται                         |
| Σημείωση : VPE = Volcanic Pyroclastic Eruption, VAC = Volcanic Ash Cloud, VDC = Volcanic Dust Contamination |  |                            |  |                                       |

## 5.1 Ηφαιστειακή στάχτη και ηφαιστειακή σκόνη (volcanic ash and dust)

Η ηφαιστειακή τέφρα αποτελείται από κατακερματισμένα σωματίδια μάγματος. Σε αρκετές περιπτώσεις περιλαμβάνονται θραύσματα πετρωμάτων και ορυκτών διαμέτρου μικρότερης από 2mm, (λιγότερο από 0,0625 mm για την ηφαιστειακή σκόνη) που παράγονται με τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Η σύνθεση της ηφαιστειακής τέφρας αντανακλά τη σύνθεση του μάγματος στο εσωτερικό του ηφαιστείου, ως εκ τούτου, ποικίλλει σε κάθε ηφαίστειο. Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, αποτελείται κατά κύριο λόγο από διοξείδιο του πυριτίου (περιεκτικότητα κατά βάρος  $\text{SiO}_2 > 50\%$ ), μαζί με μικρότερες ποσότητες οξειδίων του αλουμινίου, σιδήρου, ασβεστίου και νατρίου (Πίνακας 4). Το πυρίτιο είναι σε μορφή υαλώδη (άμορφο) και υπό το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μοιάζει με αιχμηρά θραύσματα γυαλιού (Σχήμα 33). Το πυριτικό υελώδες υλικό είναι πολύ σκληρό, συνήθως η σκληρότητά του είναι του επιπέδου 5 ή 6 στην κλίμακα Mohs. (ICAO\_Doc9691, 2007)

**Πίνακας 4.** Σύνθεση των σωματιδίων τέφρας που βρέθηκαν στα ηφαιστειακά νέφη τέφρας από εκρήξεις τεσσάρων ηφαιστίων. (Prata I.J, 1994).

| Σύνθεση                             | Ηφαίστεια    |                       |                   |                   |
|-------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
|                                     | Fuego (1974) | Mt. St. Helens (1980) | El Chichon (1982) | Galunggung (1982) |
|                                     | βάρος (%)    |                       |                   |                   |
| $\text{SiO}_2$                      | 52.30        | 71.40                 | 68.00             | 61.00             |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$             | 18.70        | 14.60                 | 15.90             | 7.10              |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{FeO}$ | 9.10         | 2.40                  | 1.60              | 7.10              |
| $\text{CaO}$                        | 9.40         | 2.60                  | 2.12              | 5.70              |
| $\text{Na}_2\text{O}$               | 3.90         | 4.30                  | 4.56              | 4.00              |
| $\text{MgO}$                        | 3.40         | 0.53                  | 0.25              | 1.70              |
| $\text{K}_2\text{O}$                | 0.80         | 2.00                  | 5.05              | 1.50              |
| $\text{TiO}_2$                      | 1.20         | 0.37                  | 0.29              | 1.30              |
| $\text{P}_2\text{O}_5$              | -            | 0.99                  | 0.00              | 0.30              |



**Εικόνα 32.** Στάχτη από την έκρηξη του ηφαιστείου Mt. St. Helens, Washington. Θραύσμα 7μm που περισυνέλεξε αεροσκάφος σε ύψος 18.3km επάνω από το Wyoming στις 21 Μαΐου 1980. (Heiken, 1991)

Η σκληρή φύση της ηφαιστειακής τέφρας την καθιστά εξαιρετικό λειαντικό, και το μικρό της μέγεθος πολύ διεισδυτική, χαρακτηριστικά που μπορεί να προκαλέσουν μεγάλη βλάβη από την τριβή σε κινούμενα και ακίνητα μηχανικά μέρη. Λόγω του ότι είναι αναπνεύσιμη, δημιουργεί κίνδυνο για την υγεία των ανθρώπων. Η ηφαιστειακή τέφρα διαχέεται στην ατμόσφαιρα σε υψόμετρο πάνω από τα 30 km (100 000 ft) και μπορεί να επηρεάζει περιοχές για εκατοντάδες έως και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από το ηφαίστειο. (Berbente, 2011)

Στην ηφαιστειολογία γίνεται σαφής διαχωρισμός μεταξύ ηφαιστειακής στάχτης και ηφαιστειακής σκόνης. Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της τέφρας είναι το βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί την ηφαιστειακή στάχτη από την ηφαιστειακή σκόνη.

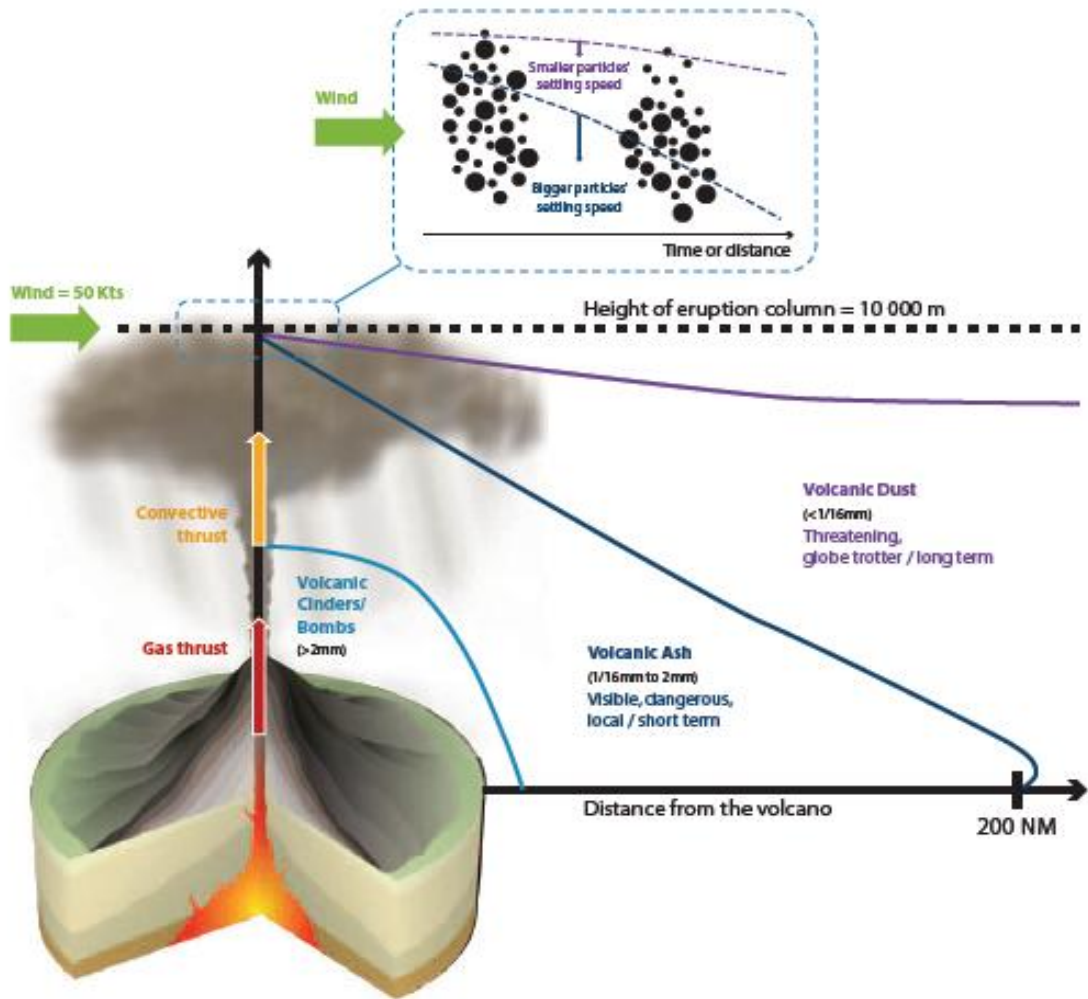
Το μέγεθος της ηφαιστειακής στάχτης είναι 1/16mm (62.5 μm) μέχρι 2mm. Από 1/16 mm και κάτω η τέφρα χαρακτηρίζεται ως ηφαιστειακή σκόνη. Και τα δύο μεγέθη της ηφαιστειακής τέφρας παραμένουν στην ατμόσφαιρα για περιορισμένο χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου μεταφέρονται από τους τοπικούς ανέμους πριν αποθεθούν στο έδαφος. Τα μεγαλύτερα στο μέγεθος σωματίδια έπεται ότι είναι και βαρύτερα και επομένως θα αποθεθούν πιο κοντά στην ηφαιστειακή πηγή.

Ενδεικτικά για την αποτύπωση της διαδικασίας διαχωρισμού που περιγράφηκε, χρησιμοποιείται υποθετικό παράδειγμα σύμφωνα με το οποίο μία συγκεκριμένη ποσότητα ηφαιστειακής στάχτης και σκόνης εκτινάσσεται στην ατμόσφαιρα σε ένα αρχικό ύψος 10 km, υψόμετρο στο οποίο φυσάει άνεμος 50 kts. Διαχωρίζοντας τα σωματίδια της τέφρας σε τέσσερις κατηγορίες με βάση τις διαστάσεις τους, στον κατωτέρω πίνακα έχουμε την διαφοροποιημένη καθίζηση για μέγεθος τέφρας 1 mm, 100 μm και 10 μm.

**Πίνακας 5.** Συνέπειες της καθίζησης σωματιδίων, ύψος στήλης εκρήξεως 10 km, οριζόντιος άνεμος 50kts (Berbente, 2011)

| <b>Ισοδύναμη διάμετρος σωματιδίων</b> | <b>1mm<br/>(ash)</b> | <b>100 μm<br/>(ash)</b> | <b>10 μm<br/>(dust)</b> | <b>1 μm<br/>(dust)</b> |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Μέση ταχύτητα πτώσης (m/s)            | 5.5                  | 0.7                     | 0.005                   | $7 \times 10^{-5}$     |
| Χρόνος καθίζησης (h)                  | 0.5                  | 4.0                     | 555.6                   | 39682.5                |
| Διανυόμενη απόσταση (NM)              | 25                   | 200                     | 27 780                  | 1 984 125              |

Η ακρίβεια της πληροφορίας που αφορά τη διάσταση των σωματιδίων της τέφρας είναι πολύ κρίσιμη για την ασφάλεια και για τη διαχείριση κρίσεως που απαιτείται σε περιπτώσεις ηφαιστειακών εκρήξεων. Ο διαχωρισμός της σύστασης της τέφρας μεταξύ στάχτης και σκόνης, επιτρέπει διαφοροποίηση στην αξιολόγηση κινδύνου, στην επεξεργασία των σχετικών δεδομένων, στην ανάλυση των στοιχείων για τη λήψη αποφάσεων και στην επιλογή ενεργειών για την αντιμετώπιση των κινδύνων που απορρέουν από κάθε κίνδυνο. Η αδυναμία διαχωρισμού οδηγεί δυνητικά σε αύξηση των οικονομικών κινδύνων, δεδομένου ότι δεν είναι όλα τα σωματίδια εξίσου επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία και τα αεροσκάφη.



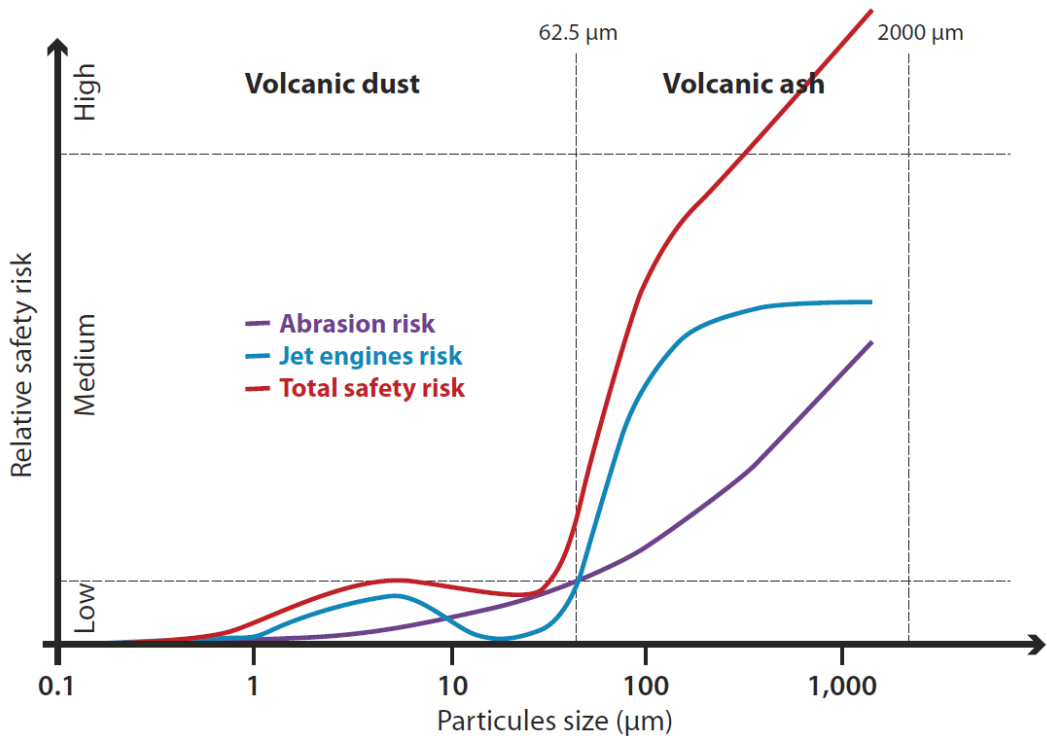
Εικόνα 33. Απεικόνιση του διαχωρισμού της τέφρας μέσω της καθίζησης (Berbente, 2011)

Το σύνολο των σωματιδίων ηφαιστειακής στάχτης που είναι μεγαλύτερα σε διάσταση από 62.5μm είναι επικίνδυνα συνολικά για το αεροπορικό έργο. Όσον αφορά την ηφαιστειακή σκόνη, τα σωματίδια των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται μεταξύ 1μm έως 10μm, αποτελούν το πλέον επικίνδυνο τμήμα του φάσματος της ηφαιστειακής σκόνης, δεδομένου ότι:

- Η ανθρώπινη υγεία απειλείται από τα ηφαιστειακά σωματίδια που είναι “εισπνεόμενα” και φτάνουν στη φατνιακή χώρα. Αφενός τα σωματίδια με διαστάσεις μεγαλύτερες από 10μm φιλτράρονται φυσικά από το ανθρώπινο σώμα με φίλτρα που διαθέτει εγγενώς. Αφετέρου τα σωματίδια με διαστάσεις μικρότερες από 1μm δεν παραμένουν στους πνεύμονες καθώς εκβάλλονται αποβάλλονται με την εκπνοή. Επομένως για την ανθρώπινη υγεία τα σωματίδια με διαστάσεις 1μm έως 10μm αποτελούν κίνδυνο.
- Οι στροβιλοκινητήρες κατά τη λειτουργία τους ακούν φυγοκεντρικές δυνάμεις στα σωματίδια ηφαιστειακής σκόνης που είναι μεγαλύτερα από 10μm και τα απομακρύνουν από την κύρια ροή αέρα, ενώ τα μικρότερα από 1μm είναι τόσο μικρά που εξαερώνονται χωρίς να τήκονται. Επομένως και οι δύο κατηγορίες είναι ακίνδυνες για τους στροβιλοκινητήρες, σε αντίθεση με την κατηγορία ηφαιστειακής

σκόνης με διαστάσεις σωματιδίων από 1μm έως 10μm που αποτελούν κίνδυνο και για τους στροβιλοκινητήρες.

Τα παραπάνω στοιχεία κινδύνου καταδεικνύουν τη σημασία διαχωρισμού της ηφαιστειακής σκόνης, ανάλογα με τις διαστάσεις των σωματιδίων που την αποτελούν, προκειμένου να καθορίζονται αποτελεσματικά τα επίπεδα κινδύνου.



**Εικόνα 34.** Σχηματική αναπαράσταση των συναρτήσεων σχετικού κινδύνου (κινητήρων, τριβής και συνολικού) συναρτήσει των διαστάσεων των κόκκων της τέφρας. (Berbente, 2011)

Ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία είναι αμελητέος συγκρινόμενος με τα αντίστοιχα επίπεδα κινδύνου που αφορούν προβλήματα στους κινητήρες των αεροσκαφών και προβλήματα αεροδυναμικής λόγω αύξησης της τριβής. Οι δύο παραπάνω παράγοντες συνυπολογίζονται και καθορίζουν το τελικό επίπεδο κινδύνου. Ποιοτική παρουσίαση των παραπάνω στοιχείων δίνεται στο γράφημα της Εικόνα 34, όπου αποτιμάται ο συνολικός κίνδυνος ως άθροισμα των επιμέρους.

## 5.2 Μέθοδος εντοπισμού της ηφαιστειακής στάχτης και σκόνης

Η αποφυγή των επικίνδυνων τμημάτων του εναερίου χώρου προϋποθέτει καταρχάς την ανίχνευσή τους. Η αναγνώριση και η παρακολούθηση της ύπαρξης και κίνησης της τέφρας πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους. Η πλέον γρήγορη και αποτελεσματική λύση θα ήταν η χρήση του μετεωρολογικού radar που διαθέτουν τα αεροσκάφη για ανίχνευση των καιρικών συνθηκών. Ωστόσο, λόγω του μήκους κύματος του radar καιρού που είναι της τάξης των 1cm με 10cm, δεν είναι εφικτή η ανάκλαση επί της ηφαιστειακής τέφρας που είναι αισθητά μικρότερη και επομένως η αποτύπωση του ηφαιστειακού νέφους είναι από ασαφής έως και αδύνατη. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος

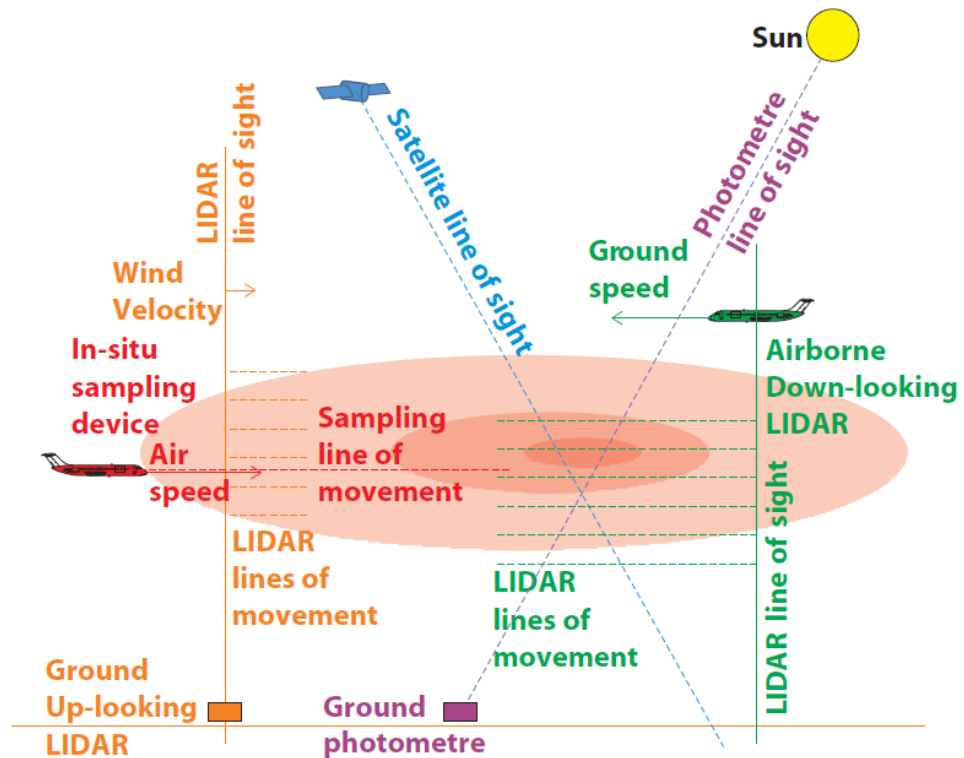
έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές λύσεις παρακολούθησης και αποτύπωσης του ηφαιστειακού νέφους.

Οι ισχύουσες τεχνικές εντοπισμού της ηφαιστειακής στάχτης και σκόνης περιλαμβάνουν:

- Την τυπική μέτρηση (δειγματοληψία) *in situ*, με τη χρήση αεροσκάφους που ίπταται για 5min με 10min εντός του ηφαιστειακού νέφους και υπολογίζει τη συγκέντρωση από το λόγο των σωματιδίων που συλλέγουν τα φίλτρα του προς το συνολικό όγκο του αέρα που διέρχεται από αυτά.
- Τη μέτρηση με LiDAR. Οι μετρήσεις μπορούν να διεξάγονται είτε από το έδαφος είτε από τον αέρα με αεροσκάφος, με τη διαφορά ότι στην πρώτη περίπτωση η στόχευση γίνεται προς τον ουρανό, ενώ στη δεύτερη προς το έδαφος. Η λειτουργία του LiDAR είναι ανάλογη με του radar με τη διαφοροποίηση ότι εκπέμπεται φωτεινή δέσμη αντί ηλεκτρομαγνητικού κύματος και επομένως είναι ανιχνεύσιμα τα σωματίδια της τέφρας λόγω του μικρού μήκους κύματος της φωτεινής δέσμης.
- Τη μέτρηση με ηλιακό φωτόμετρο. Οι ακτίνες του ηλιακού φωτός διέρχονται μέσα από την ατμόσφαιρα και λόγω της παρουσίας σωματιδίων υφίστανται απορρόφηση. Τα φωτόμετρα τοποθετούνται στο έδαφος, μετρούν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με σκόπευση απευθείας προς τον ήλιο και εξάγουν εμμέσως τη συγκέντρωση σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.
- Τη δορυφορική φωτογράφιση. Η μέτρηση λαμβάνεται από το διάστημα με δορυφόρο. Στην λαμβανόμενη φωτογραφία από το δορυφόρο τα σωματίδια ηφαιστειακής τέφρας χρωματίζονται με χαρακτηριστικό χρώμα, εντάσεως ανάλογης της συγκέντρωσης που προκύπτει αθροιστικά κατά μήκος της ατμόσφαιρας.



**Εικόνα 35.** Αερομεταφερόμενη μονάδα (κλασική επί τόπου δειγματοληψία- *in situ*) (Berbente, 2011)



Εικόνα 36. Τεχνικές μέτρησης ηφαιστειακής τέφρας (Berbente, 2011)

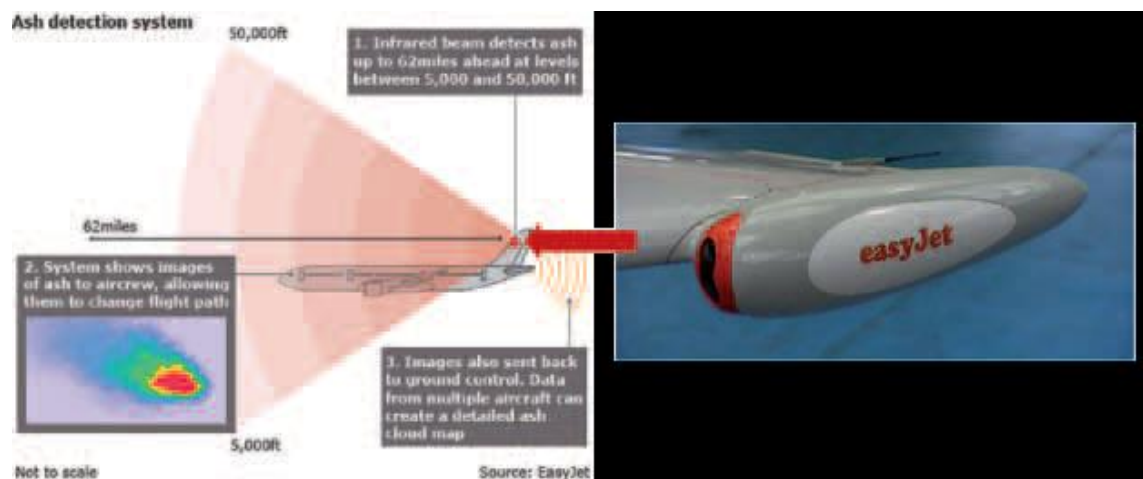
Συνοπτικά οι τεχνικές μέτρησης που εφαρμόζονται για την ανίχνευση της συγκέντρωσης των σωματιδίων της ηφαιστειακής τέφρας αποδίδεται με γραφικό τρόπο στην Εικόνα 36.

### 5.2.1 Σύγχρονα συστήματα και τεχνικές ανίχνευσης τέφρας

Το ενδιαφέρον που προέκυψε λόγω των μεγάλων οικονομικών απωλειών από πρόσφατες ηφαιστειακές εκρήξεις, οδήγησε στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών που είναι στο στάδιο της δοκιμής, καθώς δεν έχουν λάβει ακόμα τη σχετική πιστοποίηση από τους αρμόδιους οργανισμούς ασφάλειας της αεροναυτιλίας. Η τάση και ο κοινός τόπος σε όλα τα εν εξελίξει ερευνητικά έργα είναι η χρήση ειδικών συσκευών που προσαρτώνται στα αεροσκάφη δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα κατανομημένο και δυναμικό σύστημα μετρήσεων πραγματικού χρόνου με σκοπό τον εντοπισμό και την αποφυγή της ηφαιστειακής στάχτης και σκόνης.

Η easyJet, αεροπορική εταιρία του Ηνωμένου Βασιλείου, και η Nicarnica Aviation ανακοίνωσαν την πραγματοποίηση επιτυχημένων δοκιμών της τεχνολογίας ανίχνευσης τέφρας που αναπτύχθηκε σε συνεργασία με τον καθηγητή Dr. Fred Prata του Norwegian Institute for Air Research (NILU). Το AVOID (Airborne Volcanic Object Identifier and Detector) αποτελεί ένα σύστημα που στηρίζεται στην υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από συσκευή στο αεροσκάφος και μπορεί να τροφοδοτεί τον πιλότο με εικόνες της τέφρας που υπάρχει στη διαδρομή πτήσης του, δίνοντάς του έτσι τη δυνατότητα να μεθοδεύσει την αποφυγή της, εάν αυτό κρίνεται απαραίτητο.





Εικόνα 37. Το σύστημα AVOID της easyJet (Berbente, 2011)

Η τεχνολογία AVOID δίνει τη δυνατότητα στους πιλότους να μπορούν να δουν ένα σύννεφο τέφρας που βρίσκεται πιο μπροστά στη διαδρομή του αεροσκάφους σε απόσταση έως και 100km και σε υψόμετρο μεταξύ 5000ft και 50000ft. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στους πιλότους να κάνουν μικρές τροποποιήσεις στη διαδρομή πτήσης του αεροσκάφους, προκειμένου να αποφεύγουν το σύννεφο τέφρας. Η μέθοδος είναι ανάλογη με τα radar καιρού, τα οποία αποτελούν μέρος του βασικού εξοπλισμού των εμπορικών αερογραμμών στις μέρες μας. Η Airbus και η easyJet εργάστηκαν από κοινού στον έλεγχο της τεχνολογία AVOID και έχουν εκκινήσει τη διαδικασία πιστοποίησης της μεθόδου από την EASA. Η easyJet έχει δηλώσει την πρόθεσή της να εγκαταστήσει το σύστημα AVOID στα αεροσκάφη της από το καλοκαίρι του 2012 ώστε να ελαχιστοποιηθούν στο μέλλον προβλήματα στα δρομολόγια από την ηφαιστειακή τέφρα (easyJet, 2012). Στο έδαφος, η πληροφόρηση από αεροσκάφη που διαθέτουν την τεχνολογία AVOID θα ήταν χρήσιμη για τη δημιουργία μίας έγκυρης εικόνας του σύννεφου ηφαιστειακής τέφρας, χρησιμοποιώντας στοιχεία πραγματικού χρόνου και δημιουργώντας ένα ad hoc δίκτυο μετρήσεων. Αυτό θα ανοίξει μεγάλα τμήματα του εναέριου χώρου, τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα παρέμεναν κλειστά, κατά τη διάρκεια ηφαιστειακής δραστηριότητας, γεγονός που θα ωφελήσει τους επιβάτες, καθώς ελαχιστοποιεί την αναστάτωση στις πτήσεις. (Millward, 2011)

Η Airbus σκοπεύει επιπροσθέτως να εγκαταστήσει ένα διπλό σύστημα στα αεροπλάνα της. Συσκευή LIDAR ώστε να σαρώνει την περιοχή μπροστά από το αεροσκάφος σε ένα οριζόντιο 7km και μία συσκευή δειγματοληψίας που θα αξιολογεί σε συνεργασία με το LIDAR τα μακροχρόνια αποτελέσματα της έκθεσης του αεροσκάφους σε ηφαιστειακή τέφρα. Η Boeing από την πλευρά της σχεδιάζει να εγκαταστήσει συσκευές δειγματοληψίας στα αεροσκάφη Boeing 747-400 της British Airways. (Berbente, 2011)

Ακόμα όμως η επιχειρησιακή αξία αυτών των αισθητήρων παραμένει περιορισμένη αν όχι αμφισβητήσιμη και αυτό διότι οι μεν συσκευές δειγματοληψίας προειδοποιούν μόνο μετά την είσοδο του αεροσκάφους στην μολυσμένη περιοχή τα δε συστήματα AVOID και LIDAR ανήκουν στην κατηγορία των οπτικών συσκευών απεικόνισης και έχουν ως

εκ τούτου εγγενείς αδυναμίες στην ανίχνευση μολυσμένων περιοχών όταν αυτές καλύπτονται οπτικά από φυσική νέφωση.

### **5.3 Κίνδυνοι στα αεροδρόμια**

Ο κύριος κίνδυνος στα αεροδρόμια προέρχεται από την ηφαιστειακή στάχτη, η οποία περιορίζει την ορατότητα, δημιουργεί ολισθηρότητα στους διαδρόμους, διεισδύει στις επικοινωνίες και τα ηλεκτρικά συστήματα, διακόπτει τις υπηρεσίες εδάφους και δημιουργεί ζημιές στις υποδομές και στα σταθμευμένα αεροπλάνα.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα έχει προκαλέσει σημαντικούς κινδύνους σε πολλά αεροδρόμια ανά τον κόσμο. Μια ανάλυση περιστατικών που πραγματοποιήθηκε από το USGS αναδεικνύει ότι από το 1944 έως το 2006 και για 46 ηφαιστειακές εκρήξεις, υπάρχουν τουλάχιστον 171 περιπτώσεις που αφορούν 101 αεροδρόμια σε 28 χώρες τα οποία επηρεάστηκαν από την ηφαιστειακή δραστηριότητα (Guffanti, Mayberry, Casadevall, & Wunderman, 2007).

Από το 1980, πέντε αεροδρόμια κατά μέσο όρο ανά έτος επηρεάζονται από ηφαιστειακή δραστηριότητα, γεγονός που δείχνει ότι δεν είναι σπάνιο γεγονός σε παγκόσμιο επίπεδο.

#### **5.3.1 Είδη των ηφαιστειακών κινδύνων στα αεροδρόμια**

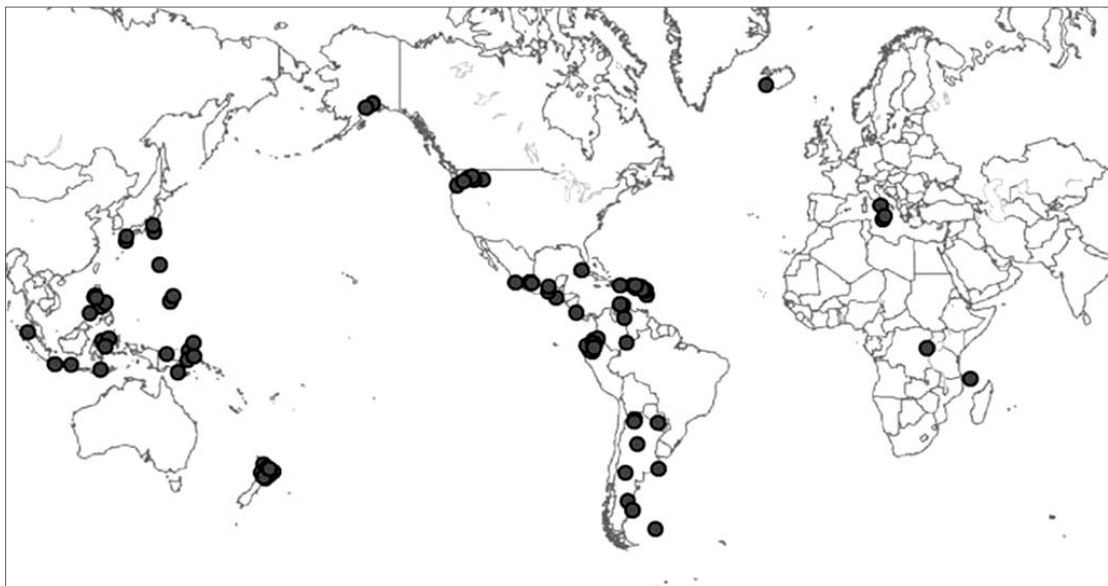
Τα είδη της επικίνδυνης ηφαιστειακής δραστηριότητας που έχουν επηρεάσει τα αεροδρόμια είναι, η πτώση τέφρας στο αεροδρόμιο, τέφρα στον περιβάλλοντα χώρο γύρω από το αεροδρόμιο, πυροκλαστικές ροές, εκπομπή ηφαιστειακών αερίων, και φρεατικές εκρήξεις.

Το τεκμηριωμένο πάχος ηφαιστειακής τέφρας που έχει συσσωρευτεί σε αεροδρόμια ποικίλει από μερικά mm έως και αρκετά cm. Το ποσό της συσσωρευμένης τέφρας εξαρτάται από το μέγεθος της έκρηξης, τη φορά του ανέμου που διασκορπίζει την τέφρα και οπωσδήποτε από την απόσταση του αεροδρομίου από το ηφαίστειο. Η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη συσσώρευση τέφρας σε αεροδρόμιο είναι 50cm και συνέβη στο αεροδρόμιο Rabaul (Papua New Guinea), το οποίο βρίσκεται 7km από το ηφαίστειο. Μεγάλες συσσωρεύσεις τέφρας επίσης προήλθαν από την πολύ μεγάλη έκρηξη του Mt.Pinatubo στις Φιλιππίνες (δεύτερη μεγαλύτερη έκρηξη στον εικοστό αιώνα) που έφτασαν τα 15-20cm σε αεροδρόμια 20-40km μακριά από το ηφαίστειο.

Η παρουσία της ηφαιστειακής τέφρας έχει σοβαρές συνέπειες για τα αεροδρόμια που βρίσκονται προσήνεμα σε σχέση με το ηφαιστειακό νέφος της τέφρας. Η τέφρα εναποτίθεται επάνω και γύρω από το αεροδρόμιο, καλύπτοντας ηλεκτρονικές συσκευές, ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό εδάφους και αεροσκάφη που σταθμεύουν ή τροχοδρομούν στον περίγυρο του αεροδρομίου (ICAO\_Doc9691, 2007).

Τα προβλήματα που προκαλούνται από την ηφαιστειακή τέφρα για τις διαδρόμους περιλαμβάνουν το μειωμένο συντελεστή τριβής του διαδρόμου προσγείωσης των αεροσκαφών, ειδικά όταν η τέφρα είναι υγρή, καθώς και σοβαρή επιδείνωση της

τοπικής ορατότητας, όταν η στάχτη στο έδαφος διαταραχθεί από τους κινητήρες των αεροσκαφών κατά την τροχοδρόμηση, την προσγείωση και την απογείωση. Η εμπειρία από ηφαιστειακές εκρήξεις παρελθόντων ετών έχει δείξει ότι στην πράξη ένα αεροδρόμιο ακόμη και με μόλις 1 mm πάχος ηφαιστειακής τέφρας μπορεί να χρειαστεί να κλείσει και να σταματήσει εντελώς τις κινήσεις αεροσκαφών για λόγους ασφαλείας. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποια από τα σημαντικότερα ενεργά ηφαίστεια της γης και χρωματίζεται η ζώνη υψηλής ηφαιστειακής δραστηριότητας γνωστή και ως δακτύλιος της φωτιάς (ring of fire). Σε μεγάλο τμήμα των περιοχών υψηλού ηφαιστειακού κινδύνου είναι απολύτως αναγκαία η δημιουργία αεροδρομίων λόγω της οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης των περιοχών αυτών, αλλά και λόγω της αντιξοότητας υιοθέτησης εναλλακτικών μέσων μετακίνησης.



**Εικόνα 38.** Αεροδρόμια που επηρεάστηκαν από ηφαιστειακή δραστηριότητα από το 1944-2006 (Guffanti, Mayberry, Casadevall, & Wunderman, 2008)

Οι συνέπειες της ηφαιστειακής τέφρας για τις ηλεκτρονικές, ηλεκτρικές και μηχανικές συσκευές των αεροδρομίων είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα στον εξοπλισμό των αεροσκαφών. Η ηφαιστειακή τέφρα διαπερνά εύκολα, ακόμη και τις πλέον στεγανοποιημένες περιοχές και αυτό ισχύει τόσο για μικρά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όσο και για τα υπόστεγα και τους χώρους συντήρησης. Τα συστήματα ψύξης, λίπανσης και φιλτραρίσματος μολύνονται συχνά σε τέτοιο βαθμό που ο εξοπλισμός καταστρέφεται καθώς είναι αδύνατο να καθαρίσει πλήρως και επομένως πρέπει να αντικατασταθεί.

Ειδικά προβλήματα μπορούν να επηρεάσουν συνολικά τα κυκλώματα υψηλής τάσης και των επιμέρους τμημάτων τους, ειδικά αν η τέφρα έχει υγρανθεί από τη βροχή που την καθιστά ηλεκτρικά πλήρως αγωγίμη. Ως αποτέλεσμα προκαλούνται βραχυκυκλώματα που μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιές σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπροσθέτως, η τέφρα δύναται να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες νερού σε περίπτωση που υγρανθεί από βρόχινο νερό. Στην περίπτωση αυτή η πυκνότητά της μπορεί εύκολα να φθάσει σε τιμές άνω των  $1400 \text{ kg/m}^3$ . Η υγρή τέφρα έχει την πυκνότητα του υγρού τσιμέντου και επομένως εάν εναποτεθεί πάνω από υπόστεγα μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση κτιρίων, όπως συνέβη στη βάση Κλαρκ της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ στις Φιλιππίνες κατά τη διάρκεια της έκρηξης του ηφαιστείου Πινατούμπο το 1991, από όπου έχουν ληφθεί και οι φωτογραφίες της Εικόνα 39.



**Εικόνα 39.** Υπόστεγα στην πολεμική αεροπορική βάση Clark, Philippines, πριν (10 Ιουνίου 1991) και μετά (24 Ιουνίου 1991) από την έκρηξη της 15ης Ιουνίου 1991 (Casadewall, 1993).

Η υγρή τέφρα που αποτίθεται σε σταθμευμένα αεροσκάφη, (ειδικά σε όσα φέρουν τον κινητήρα στο πίσω μέρος, στο rudder) μπορεί να μετατοπίσει σημαντικά το κέντρο βάρους τους και να προκαλέσει την ανατροπή τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 40.

Ποικίλα ιατρικά προβλήματα έχουν αναφερθεί σε περιπτώσεις κάλυψης αεροδρομίων από ηφαιστειακή τέφρα. Τα προβλήματα εξαρτώνται από το πάχος του στρώματος της τέφρας στο αεροδρόμιο, τους ανέμους επιφάνειας (οι οποίοι διατηρούν την τέφρα σε

εναιώρημα στον αέρα) και την εκδήλωση βροχοπτώσεων στην περιοχή (η οποία βοηθά στη διευθέτηση της τέφρας).

Σε μεγάλες συγκεντρώσεις τέφρας με πολύ ξηρές μετεωρολογικές συνθήκες και θυελλώδεις ανέμους, όπως συνέβη σε αεροδρόμια (και μάλιστα σε μεγάλες πόλεις) στην Αργεντινή μετά την έκρηξη του ηφαιστείου του όρους Hudson, στην ανατολική Χιλή το 1991, αναφέρθηκαν πολλά ιατρικής φύσεως προβλήματα. Τα προβλήματα ήταν κυρίως βρογχοπνευμονικής φύσης, οφθαλμολογικά, και εκδορές του δέρματος. Σε πιο υγρές συνθήκες, και ειδικά εάν υπάρχουν βροχοπτώσεις και δυνατοί άνεμοι γενικά, οι εκθέσεις των ιατρικών προβλημάτων τείνουν να είναι λιγότερες και λιγότερο σοβαρές.



**Εικόνα 40.** DC-10 στο έδαφος καλυμμένο από ηφαιστειακή τέφρα στην Cubi Point Naval Air Station στις Φιλιππίνες. (Casadewall, 1993).

Σε αεροδρόμια, τα οποία θεωρείται πιθανό να απειληθούν από πτώση ηφαιστειακής τέφρας, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με την ακόλουθη οργάνωση που προτείνεται από τον ICAO σε βήματα προ, μετά και κατά τη διάρκεια του φαινομένου (ICAO\_Doc9691, 2007)

- i. Πάγιες διαδικασίες διευθετήσεων πριν την ηφαιστειακή έκρηξη
- ii. Διαδικασίες που αντιμετωπίζουν την ηφαιστειακή τέφρα κατά την διάρκεια της έκρηξης, συμπεριλαμβανομένης της αρχικής πτώσης τέφρας πάνω από το αεροδρόμιο μέχρι το κλείσιμο του αεροδρομίου, και
- iii. Διαδικασίες μετά την έκρηξη με σκοπό τον καθαρισμό και την επαναλειτουργία του αεροδρομίου

Οι βασικές κατηγορίες διαδικασιών περιγράφονται στις υποενότητες που ακολουθούν.

#### 5.3.1.1 Πάγιες διαδικασίες διευθετήσεων πριν την έκρηξη

Μέτρα για την αντιμετώπιση νέφους ηφαιστειακής τέφρας πάνω από το αεροδρόμιο συνήθως συμπεριλαμβάνονται στο τμήμα του σχεδίου έκτακτης ανάγκης που σχετίζεται με το αεροδρόμιο, ωστόσο σε περιπτώσεις αυξημένου κινδύνου θα μπορούσαν να αποτελέσουν αυτόνομο εγχειρίδιο διαχείρισης εκτάκτου κινδύνου (contingency plan). Σε κάθε περίπτωση το σχέδιο πρέπει να περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη σειρά από διαδικασίες που καθορίζουν το ρόλο και τις ευθύνες του πολιτικού προσωπικού εντός του αεροδρομίου και κατά περίπτωση, και εκτός του αεροδρομίου σε περίπτωση που η πιθανή ηφαιστειακή έκρηξη απειλεί να καλύψει με ηφαιστειακή τέφρα και περιοχές πέραν του αεροδρομίου.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το αεροδρόμιο εφαρμόζει τις διαδικασίες έκτακτης ανάγκης γρήγορα και αποτελεσματικά σε περίπτωση ηφαιστειακής έκρηξης, οι βασικές διαδικασίες πρέπει να περιλαμβάνουν τις ακόλουθες ενέργειες:

- i. Διατήρηση στην αποθήκη των ελάχιστων υλικών που απαιτούνται για την κάλυψη και στεγανοποίηση των ανοιγμάτων σε αεροσκάφη και κινητήρες, στον εξοπλισμό εδάφους, σε ορισμένα κτήρια νευραλγικής σημασία και σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό και σε συστήματα πληροφορικής.
- ii. Διασφάλιση της ύπαρξης υλικών καθαρισμού (πέραν των συνηθισμένων), και του επιπλέον εξοπλισμού βαρέως τύπου για τη συλλογή τέφρας, καθώς και διαθεσιμότητα μεγάλων ποσοτήτων νερού για τον καθαρισμό της ηφαιστειακής τέφρας.
- iii. Προετοιμασία της κατάλληλης εγκεκριμένης ζώνης για την μεταφορά και εξουδετέρωση της ηφαιστειακής τέφρας σε περιοχή μακριά από το αεροδρόμιο.
- iv. Προετοιμασία για ύπαρξη βοηθητικών γεννητριών ρεύματος που θα εξασφαλίσουν εναλλακτική πηγή ηλεκτρικής τροφοδοσία σε περίπτωση βλαβών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, στην περιοχή πλησίον ή και εντός του αεροδρομίου.

#### 5.3.1.2 Διαδικασίες κατά τη διάρκεια της έκρηξης

Με την κοινοποίηση μιας έκρηξης που θα μπορούσε δυνητικά να προκαλέσει πτώση ηφαιστειακής τέφρας στο αεροδρόμιο, λαμβάνονται απευθείας όλα τα μέτρα προστασίας, όπως η αποθήκευση του εφεδρικού και πλεονάζοντος εξοπλισμού, η σφράγιση και κάλυψη των ανοιγμάτων των αεροσκαφών και των κινητήρων των αεροσκαφών, η κάλυψη του εξοπλισμού εδάφους και του εξοπλισμού των συστημάτων πληροφορικής.

Η πρώτη και σημαντική απόφαση που πρέπει να ληφθεί από τις αρχές του αεροδρομίου αφορά τη σκοπιμότητα – αναγκαιότητα να συνεχιστούν οι δραστηριότητες του αεροδρομίου ή την απόφαση για παύση της λειτουργίας του. Στη δεύτερη περίπτωση μπορεί να αποφασιστεί η δρομολόγηση αεροσκαφών σε εναλλακτικά αεροδρόμια πριν η τέφρα επηρεάσει καταλυτικά τη λειτουργία του αεροδρομίου. Η ενέργεια αυτή γενικώς προτείνεται αφού μειώνει τον αριθμό των αεροσκαφών και των επιβατών που

κινδυνεύουν να καθηλωθούν στο έδαφος και να κατ' επέκταση να εκτεθούν στους κινδύνους από την πτώση της τέφρας.

Η παρατεταμένη λειτουργία του αεροδρομίου μετά την αρχική πτώση της τέφρας αυξάνει ωστόσο τον κίνδυνο εκδήλωσης ζημιών στους κινητήρες των αεροσκαφών και προκαλεί μειωμένη τοπική ορατότητα λόγω της συνεχούς ανάδευσης αέρα και τέφρας από τη λειτουργία των κινητήρων των αεροσκαφών στους διαδρόμους προσγείωσης απογείωσης και στην περιοχή στάθμευσης και κίνησης στο αεροδρόμιο. Λόγω της μειωμένης ορατότητας καθυστερεί η λειτουργία του αεροδρομίου μέχρι να καθίσει το νέφος της τέφρας.

Η διατήρηση της αδιάλειπτης λειτουργίας του εξοπλισμού εδάφους σε μολυσμένο από ηφαιστειακή τέφρα περιβάλλον αποτελεί εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, δεδομένου ότι ο εξοπλισμός αποτελείται από μηχανήματα που λειτουργούν εκτός ανοχών αφού δεν είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν υπό αυτές τις ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος.

Αναλύοντας τις συνθήκες στα περιστατικά ηφαιστειακών εκρήξεων κοντά σε αεροδρόμια συνάγεται ότι η επίγεια υποστήριξη των αεροδρομίων συχνά αποτυγχάνει πριν καταστεί αδύνατη η λειτουργία των αεροσκαφών. Αποτέλεσμα αυτού είναι να καθηλώνονται τα αεροσκάφη από έμμεσα προβλήματα και να χάνεται πολύτιμος χρόνος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω αποσυμφόρηση του αεροδρομίου. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η περίοδος λειτουργίας των αεροδρομίων συνιστώνται οι ακόλουθες διαδικασίες και γίνονται επισημάνσεις που αφορούν ενέργειες και σημεία προσοχής στο έδαφος.

- i. Περιορισμός της ανάστροφης ώσης κατά τις προσγειώσεις. Η χρήση της μέγιστης ανάστροφης ώσης μπορεί να επηρεάσει την ορατότητα στο αεροδρόμιο και να προκαλέσει αναρρόφηση περισσότερης τέφρας από τους κινητήρες των αεροσκαφών, καθώς αυξάνεται η τοπική συγκέντρωση τέφρας στον αέρα.
- ii. Οι διαδικασίες VFR πρέπει να αποφεύγονται και να χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες IFR. Η ύπαρξη λεπτού στρώματος τέφρας δύναται να εξαφανίσει τη σήμανση του διαδρόμου προσγείωσης απογείωσης με αρνητικά αποτελέσματα στο φρενάρισμα,. Τα αποτελέσματα ύπαρξης στρώματος τέφρας μεγαλύτερου πάχους είναι αδιευκρίνιστα.
- iii. Η έγκαιρη ενεργοποίηση των συστημάτων πέδησης και των όποιων διαθέσιμων βοηθητικών συστημάτων. Η ύπαρξη υγρής τέφρας λόγω βροχής καθιστά τις επιφάνειες περισσότερο ολισθηρές και επομένως την πέδηση λιγότερο αποτελεσματική.
- iv. Η προσεκτική χρήση των συστημάτων πέδησης. Η φθορά των φρένων γενικά επιταχύνεται. Ωστόσο, φρένα που διαθέτουν αεροστεγώς κλειστά ρουλεμάν δεν επηρεάζονται.
- v. Αποφυγή της στατικής λειτουργίας των κινητήρων άνω της άεργου ισχύος.
- vi. Η αποφυγή της τροχοδρόμησης των αεροσκαφών με σβηστό κάποιον κινητήρα, δηλαδή προτείνεται η τροχοδρόμηση με όλους τους κινητήρες εν λειτουργία.

Αναφορικά με το θέμα, συμπληρωματικά προτείνεται ο έλεγχος του εγχειριδίου λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου αεροσκάφους για την επιλογή του συνδυασμού των κινητήρων.

- vii. Ο περιορισμός της ταχύτητας τροχοδρόμησης των αεροσκαφών στο ελάχιστο, ώστε να αποφεύγονται πρόσθετα προβλήματα.
- viii. Η αποφυγή της έναρξης τροχοδρόμησης και γενικότερα των διαδικασιών απογείωσης ενός αεροσκάφους ενώ η τέφρα είναι ακόμα στον αέρα. Προτείνεται γενικά η εκκίνηση της διαδικασίας απογείωσης όταν πλέον η τέφρα έχει υποστεί καθίζηση.
- ix. Η υιοθέτηση κυλιόμενης διαδικασίας απογείωσης.
- x. Ο περιορισμός της χρήσης της βοηθητικής μονάδας εκκίνησης του κινητήρα στο έδαφος.
- xi. Η αποφυγή της χρήσης των κλιματιστικών των αεροσκαφών στο έδαφος αν οι κυκλοφορητές αέρος διατηρούν επαρκές επίπεδο άνεσης. Αν η χρήση των κλιματιστικών στο έδαφος είναι απαραίτητη, θα πρέπει να λειτουργούν σε ρύθμιση ψύξης και εφόσον είναι εφικτό με χρήση επίγεια συσκευής φιλτραρίσματος αέρα.

Ταυτόχρονα με τον περιορισμό της κίνησης των αεροσκαφών θα πρέπει να συνεχίζονται οι διαδικασίες για τη στεγανοποίηση των κρίσιμων συσκευών και η αποθήκευση του εξοπλισμού του αεροδρομίου. Όταν μειωθεί η αεροπορική κίνηση πρέπει άμεσα να εκκινήσει η διαδικασία συντήρησης του εκτεθειμένου στην ηφαιστειακή τέφρα εξοπλισμού του αεροδρομίου και αλλαγή των ελαίων και των φίλτρων σε όσες συσκευές απαιτείται. Με την εφαρμογή όλων των ανωτέρω κανόνων μπορεί τελικώς να αποφευχθεί η παύση λειτουργίας του αεροδρομίου. Στη χειρότερη περίπτωση η παρατεταμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα με εκρήξεις και δημιουργία ηφαιστειακής τέφρας μπορεί να οδηγήσει στην παύση λειτουργίας του αεροδρομίου ακόμα και για αρκετές εβδομάδες (ICAO\_Doc9691, 2007).

## **5.4 Κίνδυνοι στα αεροπλάνα**

### **5.4.1 Γενικά**

Η ηφαιστειακή τέφρα, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, αποτελείται ως επί το πλείστον από θραύσματα γυαλιού και θρυμματισμένο μάγμα. Τα υλικά αυτά είναι πολύ σκληρά και η σύστασή τους σε μεγάλο βαθμό έχει βάση το πυρίτιο. Το σημείο τήξης τους δε είναι μικρότερο από τη θερμοκρασία λειτουργίας των κινητήρων σε ώση πτήσης. Η τέφρα συνοδεύεται από εκπομπές αερίων, βασικότερα εκ των οποίων είναι το διοξείδιο του θείου (θειικό οξύ) και το χλώριο (υδροχλωρικό οξύ). Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω στοιχεία εύκολο συνάγεται ο σοβαρός κίνδυνος που δημιουργείται για τα αεροσκάφη που συναντούν ηφαιστειακή τέφρα στην ατμόσφαιρα.

Η ηφαιστειακή τέφρα δημιουργεί σοβαρά προβλήματα μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται οι ζημιές στους στροβιλοκινητήρες των αεροσκαφών και οι φθορές στα παράθυρα των πιλοτηρίων, στο σκελετό του αεροσκάφους και τις επιφάνειες πτήσης, επιπροσθέτως φράζει τους αισθητήρες πτήσης (pitot-static system) του



αεροσκάφους, εισχωρεί στα συστήματα κλιματισμού και ψύξης και μολύνει τα συστήματα αεροναυτιλίας, τα ηλεκτρικά του αεροσκάφους, τα υδραυλικά συστήματα των καυσίμων και το σύστημα πυρανίχνευσης.

Οι πρώτες δύο έως τρεις ημέρες μετά την έκρηξη ενός ηφαιστείου είναι εξαιρετικά κρίσιμες, διότι υψηλές συγκεντρώσεις της τέφρας που αποτελούνται από σωματίδια μεγέθους έως ~ 10μm μπορούν να συναντηθούν σε ύψη πτήσεων σε μεγάλη απόσταση από το ηφαίστειο. Πέραν των τριών ημερών, θεωρείται ότι αν η τέφρα είναι ακόμα ορατή με γυμνό μάτι ή από δορυφορικά δεδομένα, εξακολουθεί να αποτελεί κίνδυνο για τα αεροσκάφη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση όχι. Σε κάθε περίπτωση η πλέον σοβαρή επίπτωση για τα αεριωθούμενα αεροσκάφη είναι η επίδραση της ηφαιστειακής τέφρας στους κινητήρες τους.

#### 5.4.2 Επιπτώσεις στους κινητήρες

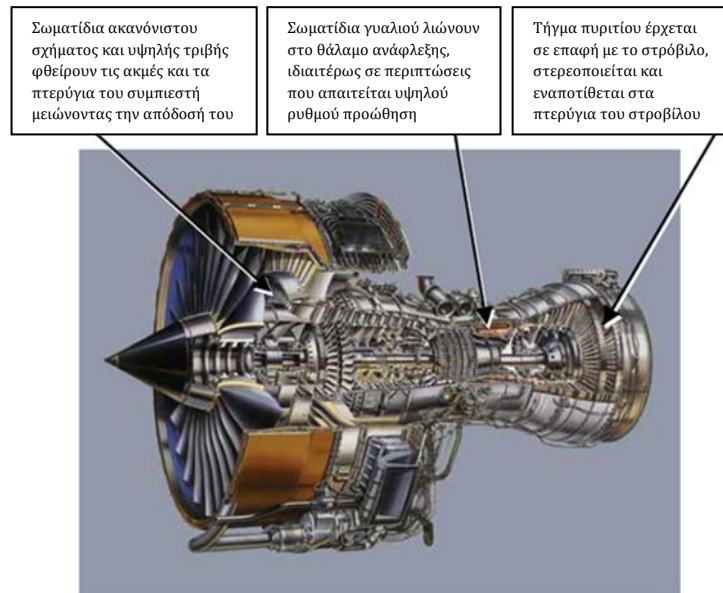
Η επίδραση της ηφαιστειακής τέφρας στους κινητήρες είναι πλέον γνωστή με λεπτομέρεια, τόσο από τα αποτελέσματα της αποσυναρμολόγησης των κινητήρων που είχαν εκτεθεί σε ηφαιστειακή τέφρα κατά τη διάρκεια της πτήσης όσο και από τις δοκιμές των κινητήρων στο έδαφος σε μολυσμένο από τέφρα πεδίο.

Η συνολική βλάβη του κινητήρα οφείλεται σε τρεις βασικούς λόγους, εκ των οποίων ο πρώτος και πιο κρίσιμος, είναι το σημείο τήξης της ηφαιστειακής τέφρας, το οποίο είναι χαμηλότερο από τις θερμοκρασίες λειτουργίας του κινητήρα τζετ ακόμη και σε λειτουργία χαμηλού ρυθμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τέφρα αποτελείται κυρίως από πυριτικά άλατα με σημείο τήξης τους 1100°C, ενώ σε επίπεδα τυπικής ώθησης η θερμοκρασία λειτουργίας των κινητήρων είναι 1400°C. Η τέφρα λιώνει στο ζεστό τμήμα του κινητήρα μέσα στο θάλαμο ανάφλεξης, κατόπιν διερχόμενη από το τμήμα του στροβίλου που έχει χαμηλότερη θερμοκρασία, τείνει να στερεοποιηθεί και αποτίθεται στα περύγια του στροβίλου προκαλώντας απόφραξη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 41.

Το φαινόμενο αυτό και μόνο μπορεί να προκαλέσει την άμεση απώλεια ώσης του κινητήρα και πιθανώς την ανάφλεξη του λόγω υπερθέρμανσης. Παλαιότερες γενιές κινητήρων, οι οποίες λειτουργούσαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ήταν λιγότερο ευαίσθητες σε αυτό το φαινόμενο, καθώς λειτουργούσαν σε θερμοκρασία κάτω του ορίου τήξης του πυριτίου. Η γενική τάση όμως σήμερα, είναι να αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας των νέων κινητήρων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ιπποδύναμή τους και να βελτιώνεται η κατανάλωση καυσίμων. Το φαινόμενο επομένως της τήξης της ηφαιστειακής τέφρας στους κινητήρες τζετ, θα εξακολουθήσει να αποτελεί κίνδυνο στο μέλλον.

Κατά τη διάρκεια επιθεωρήσεων σε κινητήρες, η ηφαιστειακή τέφρα που είχε αποτεθεί στα περύγια των στροβίλων και είχε πλέον στερεοποιηθεί, ήταν ιδιαίτερα εύθραυστη σε θερμοκρασία δωματίου και αποκολλήθηκε εύκολα και άμεσα από τα περύγια. Από το παραπάνω γεγονός συνάγεται ότι αυτή η ιδιότητα θα μπορούσε να αποτελέσει κομβικό σημείο για τη λύση του προβλήματος της τέφρας κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Προϋπόθεση θα ήταν οι μολυσμένοι από τέφρα κινητήρες να σβήσουν και εν συνέχεια να εκκινήσουν κατά την διάρκεια της πτήσης. Οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια επανεκκίνησης του κινητήρα εν πτήση φαίνεται ότι είναι δυνατόν να σπάσουν και να απορρίψουν μεγάλο μέρος της στερεοποιημένης τέφρας.



**Εικόνα 41.** Επίδραση της ηφαιστειακής τέφρας στον κινητήρα (Airbus tech manual)

Η ηφαιστειακή τέφρα επίσης διαβρώνει το στροφείο του συμπιεστή και τα πτερύγια του ρότορα προκαλώντας φθορά λόγω τραχύτητας και τριβής και ως εκ τούτου απώλεια στην απόδοση της τουρμπίνας και στην ώθηση που προσφέρει ο κινητήρας. Η διάβρωση έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη μείωση του περιθωρίου ασφαλείας της απώλειας στήριξης του κινητήρα. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την έκταση της διάβρωσης των πτερυγίων του συμπιεστή είναι η σκληρότητα της ηφαιστειακής τέφρας, η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, η συγκέντρωση της τέφρας και η ταχύτητα κρούσης. Παρά το γεγονός ότι η αποξεστική δράση επιδρά βραδύτερα στον κινητήρα σε σύγκριση με την τήξη της ηφαιστειακής τέφρας, η ζημιά που προκαλεί είναι μόνιμη και μη αναστρέψιμη. Μείωση της ώσης του κινητήρα επιβραδύνει το ρυθμό της διάβρωσης των πτερυγίων του συμπιεστή, αλλά δεν εξαλείφει εντελώς το φαινόμενο, αφού εξακολουθεί η εισροή μολυσμένου από ηφαιστειακή τέφρα αέρα στον κινητήρα, έστω και με μειωμένο ρυθμό.

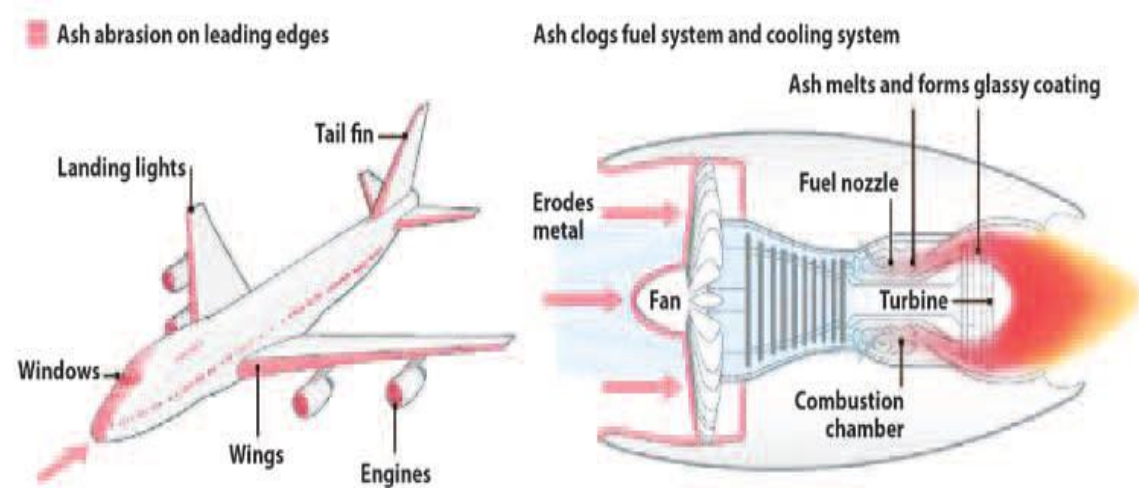
Εκτός από τα προβλήματα τήξης της ηφαιστειακής τέφρας εντός του κινητήρα και της διάβρωσης των στροφείων του που αναφέρονται ανωτέρω, η τέφρα μπορεί να φράξει τα συστήματα ψύξης και ροής των καυσίμων του κινητήρα. Μια τέτοια κατάσταση θα καθιστούσε την επανεκκίνηση του κινητήρα εν πτήση από δύσκολη έως αδύνατη.

Κατά την αποσυναρμολόγηση των κινητήρων που συμμετείχαν σε περιστατικά ανάφλεξης λόγω ύπαρξης ηφαιστειακής τέφρας (British Airways B747 το 1982 και KLM B747 το 1989) δεν αναδείχθηκαν ωστόσο στοιχεία για ακραίες αποφράξεις των

ακροφυσίων των καυσίμων και των συστημάτων ψύξης. Η μη ύπαρξη ακραίων παρατηρήσεων πιθανόν να οφείλεται στο μειωμένο χρόνο έκθεσης στην ηφαιστειακή τέφρα που δεν επαρκούσε για να παραχθεί το ανάλογο αποτέλεσμα. (ICAO\_Doc9691, 2007). Ωστόσο πρέπει να παρατηρήσουμε ότι τα συστήματα ψύξης των κινητήρων είναι επιρρεπή στη συσσώρευση ηφαιστειακών σωματιδίων. Στην περίπτωση που τα πτερύγια των κινητήρων φράζουν προκαλείται σοβαρή υπερθέρμανση και ο κινητήρας κινδυνεύει από ανάφλεξη.

### 5.4.3 Επιπτώσεις στο σκάφος και στα συστήματα πλοήγησης

Η ηφαιστειακή τέφρα εκτός από τις φθορές στον κινητήρα δημιουργεί σημαντικές φθορές και στην άτρακτο του αεροσκάφους, στα παράθυρα του πιλοτηρίου στις προεξέχουσες ακμές της άτρακτου, στο ουραίο πτερύγιο και επίσης μπορεί να προκαλέσει μιας μορφής αμμοβόληση στο χρώμα του αεροσκάφους.



**Εικόνα 42.** Περιοχές του αεροσκάφους (χρωματισμένες με κόκκινο) που επηρεάζονται άμεσα από την είσοδο του αεροσκάφους σε ηφαιστειακό νέφος (Berbente, 2011).

Τα τμήματα που προεξέχουν από την άτρακτο όπως κεραίες και παντός τύπου αισθητήρες για την ανίχνευση της ταχύτητας, του πάγου κλπ, μπορούν να υπολειπθούν, να δίνουν ψευδείς ενδείξεις, να υποστούν βλάβη ή και να αχρηστευθούν πλήρως. Από άποψη ασφαλείας το γδάρισμα των παραθύρων του πιλοτηρίου μειώνει την ορατότητα των πιλότων και συνιστά σοβαρό πρόβλημα κατά την προσγείωση. Ενός τέτοιου είδους περιστατικό ήταν η περίπτωση της British Airways B747 που πραγματοποίησε αναγκαστική προσγείωση στο αεροδρόμιο της Τζακάρτα το 1982, μετά από διέλευση μέσα από ηφαιστειακή τέφρα (Berbente, 2011).

Ζημιές στις κεραίες μπορούν να οδηγήσουν σε πλήρη απώλεια επικοινωνιών και ζημιές στους αισθητήρες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις διαθέσιμες πληροφορίες των οργάνων στους πιλότους καθιστώντας έτσι τον έλεγχο του αεροσκάφους πιο δύσκολο. Ένας από τους πιο σημαντικούς αισθητήρες που προεξέχει από την άτρακτο και είναι εγγενώς επιρρεπής σε βλάβες λόγω ηφαιστειακής τέφρας καθώς αξιοποιεί τη ροή αέρα είναι το σύστημα pitot-static. Η μερική απόφραξη ή η βλάβη του pitot μπορεί να

οδηγήσει σε αναξιόπιστες πληροφορίες για την ταχύτητα του αεροσκάφους στο σύστημα διαχείρισης πτήσης (FMS) και τους πιλότους με αποτέλεσμα την απώλεια στήριξης και άλλες πολύ επικίνδυνες συνέπειες για την πτήση.

Επιπροσθέτως τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια ηφαιστειακής τέφρας μπορεί να εισχωρήσουν μέσα από τη θωράκιση του συστήματος μετάδοσης και μέσω του συστήματος λίπανσης να περάσουν στον άξονα και να εμποδίσουν την κίνηση των γραναζιών με επακόλουθο την αλλοίωση των στοιχείων μετάδοσης κίνησης.

Η ηφαιστειακή τέφρα μπορεί να μολύνει στο αεροσκάφος το σύστημα ψύξης, το σύστημα λίπανσης, τα καύσιμα. Μετά από διέλευση του αεροσκάφους από νέφος ηφαιστειακής τέφρας η μόλυνση της ατράκτου μπορεί να φτάσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστεί αναγκαίος ο πλήρης καθαρισμός των οργάνων του πιλοτηρίου, των ηλεκτρικών επαφών ή και αντικατάσταση αυτών και ο ενδεδειγμένος καθαρισμός του χώρου των επιβατών και των αποσκευών. (ICAO\_Doc9691, 2007)

#### **5.4.4 Στοιχεία έκθεσης αεροσκαφών σε νέφη ηφαιστειακής τέφρας**

Η συλλογή και ομαδοποίηση συμβάντων ασφαλείας σε αεροσκάφη που διήλθαν μέσα από νέφη ηφαιστειακής τέφρας είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία καθώς δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία χαρακτηρισμού των ηφαιστειακών νεφών που προκάλεσαν το πρόβλημα και όπου υπάρχουν τα κοινά σημεία μεταξύ τους είναι ελάχιστα. Ταυτόχρονα η τεχνολογία των αεροπλάνων και των αισθητήρων τους έχει τροποποιηθεί αισθητά κάνοντας τις συγκρίσεις σε πολλές περιπτώσεις ανέφικτες. Η γενικευμένη θεώρηση επί του θέματος είναι επομένως απαραίτητη και ουσιαστικά στηρίζεται στα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν από το πλήρωμα ως προς τα συμπτώματα της διέλευσης μέσα από το νέφος σε κάθε περίπτωση. Στο (ICAO\_Doc9691, 2007) προτείνεται η υιοθέτηση ενός «δείκτη [από 1 έως 5] αξιολόγησης της σφοδρότητας προβλημάτων αεροσκαφών λόγω διέλευσης από νέφος τέφρας» γνωστό στη βιβλιογραφία ως “ash-encounter severity index”. Τα συμβάντα επομένως κατηγοριοποιούνται από μηδενικής κλάσης (class 0), έως πέμπτης κλάσης (class 5) ανάλογα με τα αποτελέσματά τους από τα ηπιότερα στα σφοδρότερα, στα οποία αναφέρθηκαν. Στις πλέον ακίνδυνες περιπτώσεις δεν αναφέρθηκαν εσωτερικές ή εξωτερικές ζημιές, ούτε δυσλειτουργία τμήματος του αεροσκάφους, παρά μόνο ηλεκτροστατικές εκκενώσεις και έντονη μυρωδιά από το πλήρωμα καμπίνας και τους επιβάτες λόγω της ύπαρξης θειούχων αερίων (κλάση 0), αντιθέτως σε σοβαρά συμβάντα (κλάση 4) αναφέρθηκε προσωρινή παύση των μηχανών και επανεκκίνησή τους εν πτήση. Συμβάντα κλάσης 5 δεν έχουν αναφερθεί ποτέ έως σήμερα, καθώς αφορούν οριστική αστοχία κινητήρων που οδηγεί σε συντριβή.

Με βάση τη γενικότερη κατηγοριοποίηση που περιγράφηκε οι (Guffanti, Casadewall, & Budding, 2010) συγκέντρωσαν και προσέθεσαν στοιχεία στο έργο που παρουσιάστηκε στην εργασία (Casadewall, 1993), επεκτείνοντας ταυτόχρονα το διάστημα της έρευνας και εντάσσοντας πληροφορίες σχετικά με τις εμπλοκές αεροσκαφών με νέφη ηφαιστειακής τέφρας από το 1953 μέχρι το 2009. Τα συμβάντα κατηγοριοποιήθηκαν με σκοπό να τεκμηριώσουν την φύση και την έκταση του κινδύνου λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας για την αεροπορία. Με βάση τα προτεινόμενα από τον ICAO τα

αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν από τα πληρώματα των πτήσεων και η έκταση των ζημιών των αεροσκαφών δεν περιγράφηκαν με τεχνικές και επιχειρησιακές λεπτομέρειες, καθώς διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αντιθέτως οι μελετητές ομογενοποίησαν τις παρατηρήσεις βαθμολογώντας κάθε περιστατικό με το δείκτη σοβαρότητας που προαναφέρθηκε, αδιαφορώντας για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, διευκολύνοντας έτσι την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Από τα 129 περιστατικά που αναφέρθηκαν στην συγκεκριμένη χρονική περίοδο, στα 94 περιστατικά επιβεβαιώθηκε η διέλευση μέσα από ηφαιστειακή τέφρα. Τα 79 περιστατικά έχουν διαφορετικής βαρύτητας ζημιές στην άτρακτο του αεροσκάφους και στον κινητήρα. Τα 20 περιστατικά είναι χαμηλής βαρύτητας γεγονότα που αφορούν επαφή με ηφαιστειακή τέφρα ή νέφη αερίων. Τα 15 έχουν ανεπαρκή στοιχεία για να εκτιμηθεί η σοβαρότητα, και 26 περιστατικά είναι σημαντικά με σοβαρές βλάβες στους κινητήρες και στις ατράκτους συμπεριλαμβανομένων και των 9 περιστατικών στα οποία αναφέρθηκε παύση λειτουργίας των κινητήρων κατά την διάρκεια της πτήσης.

Ο μέσος ετήσιος ρυθμός σοβαρών περιστατικών από το 1976, όταν ξεκίνησε η επίσημη έκθεση των περιστατικών, είναι περίπου 2 ανά έτος. Γενική στατιστική παρατήρηση αποτελεί το ότι η συντριπτική πλειονότητα των σοβαρών περιστατικών σημειώθηκαν εντός 24 ωρών από την ηφαιστειακή έκρηξη και την έναρξη δημιουργίας του νέφους ηφαιστειακής τέφρας και σε αποστάσεις μικρότερες των 1000km από τα ηφαίστεια.

Από τα 38 ηφαίστεια που εξεργάγησαν στο υπό μελέτη χρονικό διάστημα, 8 προκάλεσαν 5 ή και περισσότερες εμπλοκές με αεροσκάφη, εκ των οποίων οι περισσότερες ήταν σοβαρές. Συγκεκριμένα τα ηφαίστεια με σοβαρό αντίκτυπο στην ασφάλεια ήταν τα εξής: Αυγουστίνος (Ηνωμένες Πολιτείες), Τσαϊτέν (Χιλή), Όρος της Αγίας Ελένης (Ηνωμένες Πολιτείες), Pacaya (Γουατεμάλα), Pinatubo (Φιλιππίνες), Redoubt (Ηνωμένες Πολιτείες), Sakura-Τζίμα (Ιαπωνία), και Soufriere Hills (Μοντσεράτ, Μικρές Αντίλλες Ηνωμένο Βασίλειο).

Η στρατηγική άμβλυνσης των κινδύνων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των επικίνδυνων διελεύσεων αεροσκαφών μέσα από νέφη ηφαιστειακής τέφρας βασίζεται στο συνδυασμό της άμεση αναφορά της έκρηξης, της παρακολούθησης του ηφαιστείου σε πραγματικό χρόνο, της ανίχνευσης και του εντοπισμού του ηφαιστειακού νέφους χρησιμοποιώντας δορυφορικούς αισθητήρες και της ακριβούς μοντελοποίησης της διασποράς για της πρόβλεψης της κίνησης του ηφαιστειακού νέφους με την ταυτόχρονη έκδοση παγκόσμιων εξειδικευμένων προειδοποιητικών μηνυμάτων ασφαλείας. (Guffanti, Casadevall, & Budding, 2010)

## 5.5 Το σύστημα International Airways Volcano Watch

### 5.5.1 Σκοπός και κατεύθυνση του IAVW

Ο ICAO αναγνωρίζοντας τους κινδύνους που προκύπτουν συνολικά στο αεροπορικό έργο λόγω ηφαιστειακών εκρήξεων δημιούργησε ένα αυτόνομο σύστημα το International Airways Volcano Watch (IAVW), του οποίου ο ορισμός δίνεται στο (ICAO\_Annex3, 2004), ως

- ↳ *το διεθνές σύστημα διευθετήσεων και διακανονισμών για την παρακολούθηση και την παροχή προειδοποιήσεων στα αεροσκάφη σχετικά με την ύπαρξη ηφαιστειακής τέφρας στην ατμόσφαιρα.*

Το IAVW στηρίζεται στη συνεργασία αεροπορικών και μη επιχειρησιακών μονάδων που προέρχονται από πηγές παρατήρησης και δίκτυα που παρέχουν τα κράτη. Η παρακολούθηση πραγματοποιείται υπό την αιγίδα και τη διεύθυνση του ICAO σε συνεργασία και με άλλους διεθνείς οργανισμούς που έχουν άμεσο ενδιαφέρον για το θέμα. Σκοπός του IAVW είναι να επιτύχει το μέγιστο διαχωρισμό μεταξύ του ηφαιστειακού νέφους και της εναέριας κυκλοφορίας. Δεδομένου ότι η αποτροπή της ηφαιστειακής εκρήξεως και των αποτελεσμάτων της, όπως η δημιουργία ηφαιστειακού νέφους είναι αναπόφευκτη η ευθύνη του συστήματος είναι να παρακολουθεί το ηφαιστειακό νέφος και να ενημερώνει και να κατευθύνει τους πιλότους, ώστε να αποφεύγουν τους αεροδιαδρόμους που καλύπτονται από νέφος τέφρας και να τους παρακάμπτουν με ασφάλεια.

### 5.5.2 Η Δομή του IAVW

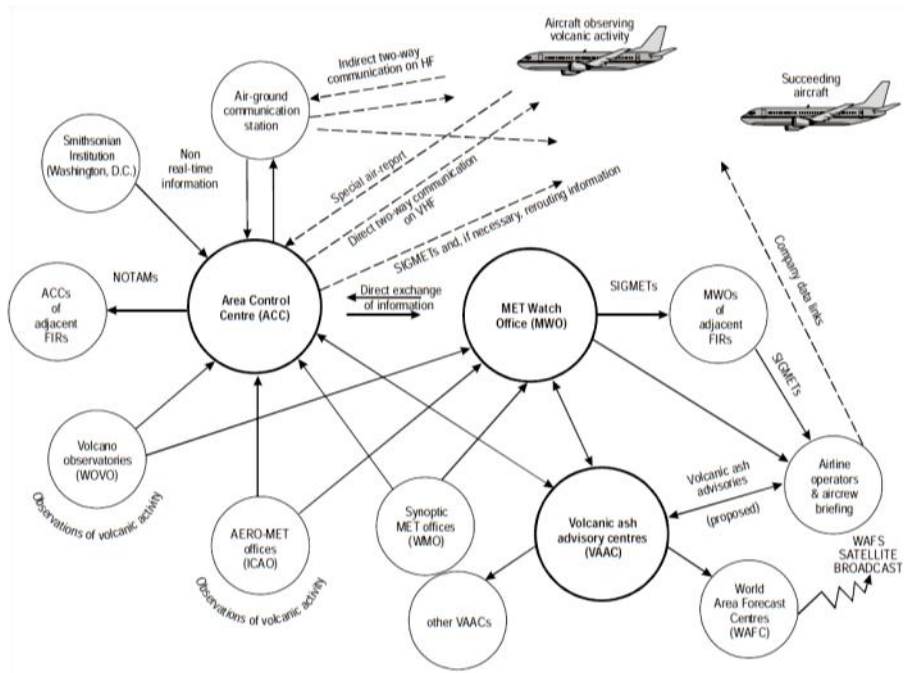
Το IAVW αποτελείται από δύο τμήματα, από το *τμήμα παρατήρησης* που περιέχει τις ακόλουθες πηγές παρακολούθησης

- ▶ Παρατηρήσεις από σταθμούς βάσης που συλλέγονται από διάφορα οργανωμένα διεθνή δίκτυα παρατήρησης, ανεξάρτητα από την εξειδικευμένη λειτουργία τους.
- ▶ Ειδικές αναφορές από αέρος (μέσα από αναφορές πιλότων)
- ▶ Παρατηρήσεις από δορυφόρους (μετεωρολογικούς και μη)

Και από το τμήμα προειδοποιήσεων και συμβουλών που παρέχει συμβουλευτικά και προειδοποιητικά μηνύματα ως ακολούθως

- ▶ NOTAM και ASHTAM που εκκινούν από τα αρμόδια ACC και εκδίδονται – διανέμονται από τα τμήματα AIS.
- ▶ SIGMET που εκδίδονται από τα MWO.
- ▶ Συμβουλευτικά μηνύματα για ηφαιστειακή τέφρα που εκδίδονται από τα VAAC.

Η συνολική δομή και λειτουργία του IAVW παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 43, όπου δίνεται έμφαση στο επιχειρησιακό τμήμα της φιλοσοφίας και εφαρμογής του συστήματος μέσα από ένα τυπικό παράδειγμα.



Εικόνα 43. Οργάνωση του International Airways Volcano Watch (ICAO\_Doc9691, 2007).

Η ανάλυση των σχέσεων μεταξύ των οργανισμών και το διεθνές κανονιστικό πλαίσιο που περιγράφει απαιτήσεις, αρμοδιότητες και ευθύνες δίνεται συνοπτικά με διάγραμμα στο (ICAO\_Doc9691, 2007) και αναλυτικά στο (ICAO\_Doc9766, 2004).

### 5.5.3 Τμήμα παρατηρήσεων του IAVW

Το τμήμα παρατηρήσεων του IAVW αποτελείται από τρεις διαφορετικές κατηγορίες πηγών που αναφέρθηκαν συνοπτικά στην προηγούμενη ενότητα, καθεμία εκ των οποίων αποτελείται από επί μέρους τμήματα.

#### 5.5.3.1 Παρατηρήσεις από σταθμούς εδάφους

Το τμήμα των παρατηρήσεων εδάφους αποτελείται από διάφορα κέντρα παρατήρησης και δίκτυα παρατήρησης που ανήκουν σε ανθρωπιστικούς και επιστημονικούς διεθνείς οργανισμούς, οι οποίοι σε συμφωνία με τον ICAO και υπό την καθοδήγησή του συμφώνησαν στη συνεργασία με σκοπό την εγκαθίδρυση του συστήματος IAVW. Οι οργανισμοί που συμμετέχουν και οι παρεχόμενες υπηρεσίες και δίκτυα υποστήριξης είναι οι εξής:

- World Organization of Volcano Observatories (WOVO) που παρέχει παρατηρητήρια ηφαιστειών, δίκτυο ηφαιστειολόγων, σεισμολογικούς σταθμούς.
- World Meteorological Organization (WMO) που παρέχει μετεωρολογικά παρατηρητήρια, κλιματολογικούς σταθμούς, εμπορικά πλοία
- United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) που παρέχει φορητούς σταθμούς περίθαλψης πληγέντων.

Επιπροσθέτως υπό την επίβλεψη και διαχείριση του ICAO υπογράφονται συμφωνίες και MOA με διάφορες κρατικές υπηρεσίες και μηχανισμούς μεταξύ των οποίων μπορεί

να είναι η γενική αεροπορία, τα αστυνομικά και στρατιωτικά ταχυδρομεία, τελωνειακά γραφεία, γεωλογικές υπηρεσίες, δασικοί σταθμοί κτλ.

Τα εγχειρίδια λειτουργιών και το κανονιστικό πλαίσιο που περιγράφουν το έργο των δικτύων που διαθέτουν οι εν λόγω οργανισμοί, ανανεώνονται ώστε να προβλέπουν σαφώς ότι σε περιπτώσεις που το προσωπικό παρακολούθησης είτε παρατηρεί κάποια ηφαιστειακή έκρηξη ή νέφος τέφρας, είτε λαμβάνει εμμέσως γνώση, οφείλει να ενημερώνει άμεσα. Η ενημέρωση έχει αποδέκτη το αμέσως πλησιέστερο ACC ή το MWO και πραγματοποιείται μέσα από υπάρχουσες δεσμευμένες τηλεπικοινωνιακές γραμμές, ή μέσω telex ή τηλεομοιοτυπίας.

#### 5.5.3.2 Παρατηρήσεις από διερχόμενα αεροσκάφη

Οι παρατηρήσεις από αέρος είναι οι πλέον συνηθισμένες, καθώς μόνο ένας μικρός αριθμός επί του συνόλου των ηφαιστειών παρατηρείται σε μόνιμη βάση από εδάφους και επομένως οι πιθανότητες ανίχνευσης από εκεί είναι μικρές. Πρακτικά οι πιλότοι λόγω της συνεχούς μετακίνησής τους σε όλο τον εναέριο χώρο αλλά και της ευρείας εποπτείας που οφείλεται στο ύψος παρατήρησης, αποτελούν την κύρια πηγή ενημέρωσης για την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Η εμπλοκή και διέλευση αεροσκάφους μέσα από νέφος ηφαιστειακής τέφρας είναι ωστόσο μη αποδεκτή κατάσταση λόγω των κινδύνων που εκθέσαμε σε προηγούμενες ενότητες και επομένως η τάση είναι να επιτηρούνται με άλλες μορφές παρατήρησης τα ηφαίστεια και να μειώνεται το ποσοστό αρχικών αναφορών από πιλότους που συνεπάγεται αυτομάτως και τους ανάλογους κινδύνους.

Η αναφορά ηφαιστειακής δραστηριότητας, ή ηφαιστειακής έκρηξης ή νέφους ηφαιστειακής τέφρας γίνεται από ειδικό έντυπο αναφοράς με πρότυπη διαμόρφωση (Volcanic Activity Reporting – VAR), με σκοπό την ομοιομορφία στις αναφορές και τη διευκόλυνση των πιλότων, σύμφωνα με τις οδηγίες που περιγράφονται στο (ICAO\_Doc4444, 2007). Στις αναφορές περιλαμβάνονται και στοιχεία και καιρού και ιδιαίτερος ανέμου για την πρόβλεψη κίνησης του νέφους από τους μετεωρολόγους. Μετά την ενημέρωση μέσω ασύρματης επικοινωνίας προς τις μονάδες εδάφους, ο πιλότος παραδίδει το συμπληρωμένο έντυπο στο προσωπικό εδάφους στο σημείο προσγείωσης και βοηθά με την περιγραφή και τη μαρτυρία του για τον καθορισμό του είδους της έκρηξης σε συνεργασία με τους ηφαιστειολόγους.

#### 5.5.3.3 Δορυφορικές παρατηρήσεις

Το τμήμα παρατηρήσεων που αποτελείται από δορυφόρους για την παρατήρηση ηφαιστειακών εκρήξεων και νεφών τέφρας είναι το πλέον αναπτυσσόμενο τα τελευταία έτη δεδομένων των νέων τεχνικών παρατήρησης και επεξεργασίας της δορυφορικής αλλά και λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για απομακρυσμένη παρατήρηση (remote sensing technology). Το μεγαλύτερο τμήμα των δορυφόρων που παρακολουθούν ηφαιστειακή δραστηριότητα και ηφαιστειακή τέφρα περιστρέφονται σε τροχιές που περνούν από τους δύο πόλους (polar-orbit satellites). Οι δορυφόροι polar orbit έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν εντός 12 ωρών να



παρατηρήσουν όλα τα σημεία της γης (Maral & Bousquet, 2009). Οι τροχιές τους έχουν κλίση 90° ως προς τον ισημερινό και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαρτογράφησης και παρατηρήσεων. Τυπικό παράδειγμα είναι οι δορυφόροι του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Η παρατήρηση ηφαιστειακής τέφρας γίνεται και από γεωστατικούς μετεωρολογικούς δορυφόρους που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση συγκεκριμένου τμήματος της γης ο καθένας. Οι δορυφόροι που προαναφέρθηκαν αποτελούν συστατικό τμήμα του Global Observing System του World Weather Watch, το οποίο διαχειρίζεται και διευθύνει ο οργανισμός WMO. Οι προβλέψεις και ο προγραμματισμός που αφορούν τους εν λόγω δορυφόρους οδηγούν στο συμπέρασμα ότι θα συνεχίσουν να υπάρχουν και να ανανεώνονται όταν απαιτείται διατηρώντας το δίκτυο δορυφορικής παρακολούθησης επαρκές για το σκοπό της παρακολούθησης ηφαιστειακής δραστηριότητας και νέφους τέφρας για τουλάχιστον μια δεκαετία ακόμα. Το ενδιαφέρον του WMO για το συγκεκριμένο ζήτημα αναδεικνύεται από τη ρητή του δέσμευση να αναπτύσσει δορυφορικές τεχνικές, να βελτιώνει τα δορυφορικά δεδομένα και να κάνει αποτελεσματικότερη την επεξεργασία τους σε συνεργασία με τον ICAO, με σκοπό την βέλτιστη παρακολούθηση των ηφαιστειακών εκρήξεων και των νεφών τέφρας.

#### 5.5.4 Τμήμα παροχής – διακίνησης προειδοποιήσεων και συμβουλών του IAVW

Το τμήμα παροχής και διακίνησης προειδοποιήσεων και συμβουλών του IAVW αποτελείται από επιχειρησιακές μονάδες διαφορετικών αρμοδιοτήτων μεταξύ των οποίων διακρίνουμε τις εξής τρεις βασικές κατηγορίες.

- ▶ Area Control Centers και Flight Information Centers (ACC/FIC)
- ▶ Meteorological Watch Offices (MWO)
- ▶ Volcanic Ash Advisory Centers (VAAC)

##### 5.5.4.1 Υπηρεσίες Ελέγχου Περιοχής και Πληροφοριών Πτήσης (ACC/FIC)

Το σύνολο του εναερίου χώρου παγκοσμίως είναι τεμαχισμένο σε Flight Information Regions (FIRs), περιοχές δηλαδή στις οποίες παρέχονται πληροφορίες πτήσης και προειδοποιήσεις/συνεγέρσεις. Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, κάθε FIR αποτελείται από ένα ή και περισσότερα (Area Control Centers – ACC) που συστήνονται από το κράτος που ελέγχει το FIR, ώστε να παρέχονται αποτελεσματικά υπηρεσίες ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (Air Traffic Control Service – ATC). Το FIR χωρίζεται επίσης σε (Flight Information Centers – FICs), μονάδες από τις οποίες παρέχονται υπηρεσίες πληροφοριών πτήσεως και υπηρεσίες συνέγερσης. Οι δύο μονάδες συνήθως συνδυάζονται λειτουργικά και επικοινωνούν με τα αεροσκάφη του τομέα ευθύνης τους μέσω ασυρμάτων ζεύξεων. Το ACC/FIS έχουν ως υποχρέωση να γνωστοποιούν στα αεροσκάφη επιχειρησιακές πληροφορίες που αφορούν λειτουργικότητα συστημάτων, καιρικές συνθήκες και οτιδήποτε άλλο θα μπορούσε να επηρεάσει την πτήση. Ειδικά σε περιπτώσεις πληροφοριών με άμεση επίπτωση στις πτήσεις το ACC μεταδίδει την πληροφορία που λαμβάνει σε πρότυπη μορφή ως Notice to Air Men (NOTAM) μέσω ασυρμάτου προς ενημέρωση των άμεσα ενδιαφερομένων αεροσκαφών. Σε περιπτώσεις ηφαιστειακών εκρήξεων που οδηγούν σε προσωρινό

αποκλεισμό αεροδιαδρόμων εκδίδεται NOTAM που επισημαίνει τα κλειστά τμήματα του εναερίου χώρου, πιθανές εναλλακτικές διαδρομές και το χρόνο για τον οποίο ισχύει η τροποποίηση. Σε περίπτωση που ο εναέριος χώρος καθαρίσει από την ηφαιστειακή τέφρα το NOTAM ακυρώνεται και επανέρχεται η κανονική λειτουργία των αεροδιαδρόμων. Ξεχωριστή κατηγορία NOTAMs έχει αφιερωθεί στην ενημέρωση για ηφαιστειακή δραστηριότητα και ονομάζεται ASHTAM. Τυπικό δείγμα ASHTAM από την έκρηξη στην Αίτνας δίνεται στην ακόλουθη εικόνα, όπου συμπληρωματικά ερμηνεύεται η σημασία του κάθε πεδίου του μηνύματος.

|   |   |
|---|---|
| FVXX01 LFPW 131637  |   |
| VA ADVISORY   | <a href="#">Date Time Group</a>   |
| DTG: 200805131630Z  | <a href="#">Volcano Ass Advisory Control</a>  |
| VAAC: TOULOUSE  | <a href="#">Document 9691 - Appendix F</a> όπου περιγράφονται σχετικά με ηφαιστειακά: όνομα, θέση, κωδικός, bearing από το πλησιέστερο ραδιοβόηθημα. (π.χ. santorini/greece/102-04/N3624.1E02325.5/1) |
| VOLCANO: ETNA 0101-06   |   |
| PSN: N3744 E01500   |   |
| AREA: ITALY   |   |
| SUMMIT ELEV: 3350M  | <a href="#">Document 9692 - Annex 15 (ASHTAM)</a> : εκτίμηση μέγιστου ύψους επιρροής  |
| ADVISORY NR: 2008/06  | Αριθμός Παρατήρησης και Εκδότρια Αρχή (τελευταία παρατήρηση: 2009/565)  |
| INFO SOURCE: METEOSAT IMAGERY   |   |
| AVIATION COLOUR CODE: UNKNOWN   | <a href="#">Κατάσταση Ηφαιστείου</a> σύμφωνα με τους Διεθνείς Κανονισμούς Αεροναυτιλίας   |
| ERUPTION DETAILS: NEW ERUPTION AT ABOUT 1500Z   |   |
| OBS VA DTG: 131600Z   | <a href="#">Πληροφορίες για το Ηφαιστειακό Νέφος:</a>   |
| OBS VA CLD: FL050/300 N3740 E01500 - N3840 E01540 - N3920 E01540 - N3915 E01615 - N3825 E01550 - N3740 E01500 MOV NNE 30 KT FL080/400 | Ύψος  |
| N4155 E01500 - N4200 E01600 - N4020 E01615 - N4155 E01500 MOV NNW 40KT  | Ωρα   |
| FCST VA CLD + 6H: 13/2200Z FL050/300 N3925 E01620 - N4035 E01625 - N4050 E01710 - N3925 E01620  | Γεωγραφικό Μήκος & Πλάτος   |
| FCST VA CLD + 12H: 14/0400Z NO VA EXP   | Κίνηση  |
| FCST VA CLD + 18H: 14/1000Z NO VA EXP   | Πρόβλεψη θέσης σε 6, 12 & 18 επόμενες ώρες  |
| RMK: PLEASE CHECK SIGMET FOR CURRENT WARNINGS.  |   |
| NXT ADVISORY: NO LATER THAN 20080513/2300Z=   | <a href="#">Χρόνος Έκδοσης επόμενου Δελτίου</a>   |

**Εικόνα 44.** Οδηγία που εκδόθηκε από το Γραφείο της Τουλούζης για την έκρηξη της Αίτνας στις 13/05/2008 (Φωτάκος, 2010)

Τα δύο είδη μηνυμάτων έχουν την ίδια ισχύ και τον ίδιο σκοπό, ωστόσο η ενημέρωση μέσω ASHTAM είναι πιο αποτελεσματική καθώς μέσω του ονόματος φανερώνεται το περιεχόμενο του μηνύματος και επομένως δρομολογείται άμεσα και κατά προτεραιότητα στα αεροσκάφη.

#### 5.5.4.2 Μετεωρολογικές Υπηρεσίες (MWO)

Η διαδικασία απόδοσης στα κράτη των FIRs προϋποθέτει σύμφωνα με τον ICAO την εγκαθίδρυση μονάδων Meteorological Watch Offices (MWO) τα οποία παρακολουθούν τις μετεωρολογικές συνθήκες στο FIR ή στο ACC στο οποίο παρέχουν υπηρεσίες και εκδίδουν μηνύματα SIGMET ή AIRMET, όπως προβλέπεται στο (ICAO\_Annex3, 2004), για να ειδοποιήσουν τα αεροσκάφη είτε για φαινόμενα που παρατηρούνται, είτε για μετεωρολογικές προβλέψεις που αφορούν περιοχές που θα συναντήσουν κατά την προκαθορισμένη πλοήγησή τους και τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την ασφάλεια τους.

Τα AIRMET εκδίδονται για πτήσεις που βρίσκονται σε χαμηλά ύψη μέχρι FL100 ή FL150 σε ορεινές περιοχές, ενώ τα SIGMET εκδίδονται για όλα τα επίπεδα πτήσης. Προφανώς για ενημέρωση σχετικά με την ύπαρξη ηφαιστειακής τέφρας εκδίδονται SIGMET, αφού το φαινόμενο αφορά τις πτήσεις σε όλα τα ύψη και ιδιαίτερα όσες βρίσκονται σε μεγάλα ύψη.

Τα μηνύματα SIGMET γενικά έχουν διάρκεια ισχύος 4h με 6h, αλλά στην περίπτωση της ηφαιστειακής τέφρας εκδίδονται για τη μέγιστη διάρκεια. Το αρχικό SIGMET που

εκδίδεται για να ενημερώσει για την εναέρια κυκλοφορία για την ύπαρξη νέφους ηφαιστειακής τέφρας περιλαμβάνει πληροφορίες όπως το όνομα του ηφαιστείου, την τοποθεσία του (συντεταγμένες), πιθανό ύψος νέφους τέφρας και κατεύθυνση εφόσον είναι γνωστή. Το MWO που έχει την ευθύνη της περιοχής αναλύει τις εικόνες από τους δορυφόρους και αποφαινεται για την ύπαρξη νέφους τέφρας και τη διάστασή του, καθορίζοντας τα όρια μεταξύ νεφών πάγου/νερού και νέφους τέφρας.

Το επόμενο στάδιο είναι η πρόβλεψη από το MWO της τροχιάς και της εξάπλωσης του νέφους τέφρας. Η πρόβλεψη αυτού του είδους είναι ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία και τα περισσότερα WMOs δεν έχουν τη δυνατότητα να την πραγματοποιήσουν με καλά αποτελέσματα, γεγονός που συμβαίνει εν γνώσει του ICAO. Προς επίλυση του προβλήματος ο ICAO σύστησε εννέα Volcanic Ash Advisory Centers (VAAC) με έργο και αρμοδιότητα την αρωγή και συμβουλευτική καθοδήγηση των MWOs και των ACCs που είναι στην περιοχή ευθύνης τους για την πρόβλεψη της κίνησης της ηφαιστειακής τέφρας. Τα VAACs είναι το τρίτο συστατικό μέρος του συμβουλευτικού τμήματος του IAVW, αλλά λόγω του ειδικού και καθοριστικού του ρόλου στις ηφαιστειακές κρίσεις θα αναπτυχθεί ξεχωριστά στην επόμενη ενότητα.

## 5.6 Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας (VAAC)

Τα Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας (Volcanic Ash Advisory Centers – VAACs) δημιουργήθηκαν από τον ICAO για να επικουρούν τα ACCs και τα MWOs σε θέματα που προκύπτουν στην εναέρια κυκλοφορία, λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται στο (ICAO\_Appex3, 2004) ως μετεωρολογικά κέντρα, τα οποία μέσω τοπικής συμφωνίας με την εναέρια κυκλοφορία έχουν οριστεί να παρέχουν βοηθητικές συμβουλευτικές πληροφορίες στα MWO και στα ACC/FIC και αποτελούν παγκόσμιες βάσεις δεδομένων για την έκταση των νεφών τέφρας (οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση) και την κίνησή της στην ατμόσφαιρα μετά την ηφαιστειακή έκρηξη.

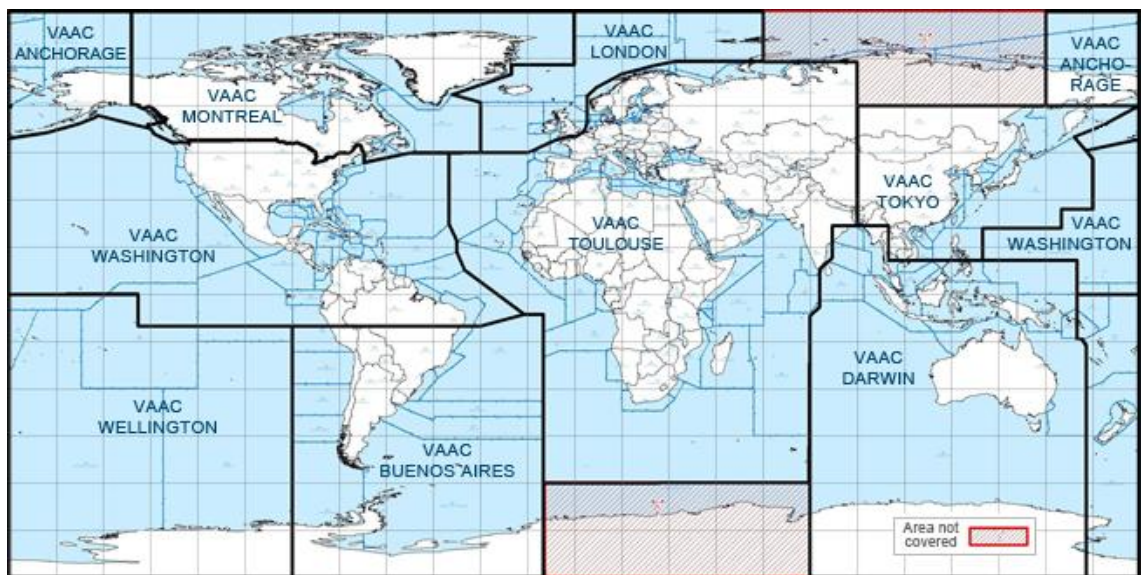
Η λειτουργία των VAACs στηρίζεται από κράτη μέλη του ICAO και συγκεκριμένα κάποιο κράτος ανά περιοχή αποδέχεται τη συμφωνία με την εναέρια κυκλοφορία σε τοπικό επίπεδο και παρέχει ένα VAAC στο πλαίσιο λειτουργίας του IAVW. Ο ICAO έχει ορίσει τα εννέα VAACs που είναι αρμόδια για να παρέχουν συμβουλευτικές υπηρεσίες σε κάθε γεωγραφική περιοχή και τα οποία ονομαστικά είναι τα εξής

- ⊕ Anchorage, ΗΠΑ
- ⊕ Buenos Aires, Αργεντινή
- ⊕ Darwin, Αυστραλία
- ⊕ London, Ηνωμένο Βασίλειο
- ⊕ Montreal, Καναδάς
- ⊕ Tokyo, Ιαπωνία
- ⊕ Toulouse, Γαλλία
- ⊕ Washington, ΗΠΑ
- ⊕ Wellington, Νέα Ζηλανδία

Οι περιοχές ευθύνης του καθενός εκ των VAACs παρουσιάζονται στο χάρτη της εικόνας 44.

Η αρμοδιότητα των VAACs είναι όταν λαμβάνουν ενημέρωση ότι υπήρξε ή επίκειται ηφαιστειακή έκρηξη, ή όταν υπάρχει αναφορά για νέφος ηφαιστειακής τέφρας στην περιοχή ευθύνης τους να ενεργοποιούν το μηχανισμό παρακολούθησης πρόβλεψης και ενημέρωσης που περιλαμβάνει τα ακόλουθα

1. Παρακολούθηση των σχετικών γεωστατικών και των polar – orbit δορυφόρων για την ανίχνευση της ύπαρξης και της έκτασης του νέφους ηφαιστειακής τέφρας στην ατμόσφαιρα, στην περιοχή ενδιαφέροντος.
2. Ενεργοποίηση των αριθμητικών μοντέλων διασποράς και κίνησης της ηφαιστειακής τέφρας, προκειμένου να γίνει πρόβλεψη για την τροχιά που θα ακολουθήσει το ηφαιστειακό νέφος που εντοπίστηκε. Σε περιπτώσεις που το αρμόδιο VAAC δεν διαθέτει το δικό του σύστημα αριθμητικής μοντελοποίησης, απευθύνεται στο VAAC με το οποίο έχει υπογράψει συμφωνία για την παροχή της εν λόγω υπηρεσίας.



Εικόνα 45. Περιοχές ευθύνης των εννέα VAACs που απαρτίζουν το IAVW (ICAO\_Doc9766, 2004).

3. Έκδοση συμβουλευτικών πληροφοριών για την έκταση του φαινομένου και την πρόβλεψη για την επέκταση και την κατεύθυνση της τέφρας και αποστολή στα
  - i. στα MWOs, στα ACC/FIC που εξυπηρετούν τις περιοχές FIR που βρίσκονται σε περιοχές που επηρεάζονται από την τέφρα.
  - ii. σε άλλα VAACs των οποίων η περιοχή ευθύνης μπορεί να επηρεαστεί – πληγεί.
  - iii. στις βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων και στα παγκόσμια κέντρα μετεωρολογικών προβλέψεων και στα διεθνή γραφεία NOTAM
  - iv. στις αεροπορικές εταιρίες που ζητούν συμβουλευτική πληροφόρηση μέσω του συστήματος AFTN

4. Έκδοση ανανεώσεων των παραπάνω συμβουλευτικών πληροφοριών και αποστολή προς τους ενδιαφερόμενους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, κατ' ελάχιστον κάθε 6h, έως ότου το σύννεφο τέφρας δεν μπορεί να ανιχνευθεί πλέον από τους δορυφόρους, δεν υπάρχουν αναφορές για ύπαρξη τέφρας από τα αεροσκάφη και έχει σταματήσει η ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Προφανώς η ειδική λειτουργία των VAACs απαιτεί 24ωρη παρακολούθηση ώστε να μπορεί να υποστηρίζει το έργο των ACCs και MWOs όποτε αυτό απαιτηθεί. Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιχειρησιακές διαδικασίες των VAACs υπάρχουν αναλυτικά (ICAO\_Doc9766, 2004), ενώ στοιχεία που αφορούν τις τεχνικές και επιστημονικές λεπτομέρειες και τεχνικές συμπεριλαμβάνονται στο (ICAO\_Doc9691, 2007).

## 5.7 Μοντέλα διασποράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας

### 5.7.1 Περιγραφή δημοφιλέστερων μοντέλων VATDM

Η κατανομή του εναερίου χώρου από τον ICAO σε τομείς ευθύνης των εννέα VAACs που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, έχει ως αποτέλεσμα το σύνολο του Ευρωπαϊκού εναερίου χώρου να ανήκει σε δύο εξ' αυτών. Τα VAAC London και VAAC Toulouse έχουν την ευθύνη όχι μόνο του ευρωπαϊκού χώρου αλλά και ενός αρκετά ευρύτερου χώρου γύρω από την Ευρώπη που περιλαμβάνει μεγάλο κομμάτι του Β. Ατλαντικού, τη μισή Ασία και ολόκληρη την Αφρική. Στην ενότητα αυτή για τον παραπάνω λόγο θα ασχοληθούμε κυρίως με τα μοντέλα πρόβλεψης διασποράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας που χρησιμοποιούν τα συγκεκριμένα VAACs.

#### 5.7.1.1 Μοντέλο NAME

Το μοντέλο Numerical Atmospheric–dispersion Modeling Environment (NAME) αποτελεί το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται από το VAAC London, του οποίου η ανάπτυξη ξεκίνησε μετά την πυρηνική έκρηξη στο Chernobyl το 1986, και έκτοτε χρησιμοποιήθηκε σε ευρύ φάσμα γεγονότων ατμοσφαιρικής διασποράς μεγάλης κλίμακας. Το μοντέλο χρησιμοποιείται όχι μόνο σε καταστάσεις κρίσης ως εργαλείο καθοδήγησης για την αποφυγή προβληματικών περιοχών, αλλά και για τυπικές μετεωρολογικές προβλέψεις της ποιότητας του αέρα. Το NAME έχει τη δυνατότητα να προβλέπει τη διασπορά σε αποστάσεις που ξεκινούν από μερικά km και μπορεί να φτάνουν σε διάσταση ολόκληρη τη γη (Ryall & Marion, 1998). Αναφορικά με το χρόνο πρόβλεψης το NAME προβλέπει για περιόδους που ξεκινούν χρονικά από μερικά λεπτά και φτάνουν θεωρητικά σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή στο μέλλον, όμως πρακτικά τα διαστήματα εμπιστοσύνης μειώνονται, όπως συμβαίνει και στα απλά μετεωρολογικά μοντέλα, σε βαθμό που καθιστούν την πρόβλεψη μη αξιόπιστη. Πρόκειται για ένα μοντέλο σωματιδίων με επιλύσεις τύπου Lagrange, που υπολογίζει τη διασπορά των σωματιδίων μόλυνσης παρακολουθώντας τις τροχιές τους μέσα από ατμοσφαιρικά μοντέλα (Jones, Thomson, Hort, & Devenish, 2007). Επίσης με στατιστική περιγραφή μέσω κατάλληλης τυχαίας μεταβλητής μπορεί και ενσωματώνει στοχαστικά στοιχεία

ατμοσφαιρικών διαταραχών. Το NAME χρησιμοποιεί επίσης στοιχεία που αφορούν την πτώση λόγω βαρύτητας, την αλλοίωση λόγω βροχοπτώσεων και την ενσωμάτωση σε υπάρχοντα σύννεφα υδρατμών. Σημαντικό στοιχείο του NAME είναι η απόδοση και χημικών χαρακτηριστικών στα σωματίδια, που επιτρέπει την αξιολόγηση και πιθανών χημικών διεργασιών όταν έρχεται η τέφρα σε επαφή με αντιδρώντα στοιχεία της ατμόσφαιρας.

#### 5.7.1.2 Μοντέλο MOCAGE – accident

Το MOCAGE – accident αποτελεί ειδική έκδοση του MOCAGE (Modèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle) που είναι χημικό μοντέλο και μοντέλο μεταφοράς και εξάπλωσης σωματιδίων που αναπτύχθηκε από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία της Γαλλίας. Στην έκδοση accident λαμβάνονται υπόψη μόνο οι φυσικές και δυναμικές διαδικασίες και δεν αξιολογούνται τα χημικά στοιχεία. Το μοντέλο αντλεί μετεωρολογικά στοιχεία όπως υδροστατικούς ανέμους, θερμοκρασία, υγρασία και πίεση και σε συνδυασμό με φυσικές παραμέτρους αξιολογεί και προβλέπει κάθε 6 ώρες, ενώ στο μεσοδιάστημα με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής εξάγει προβλέψεις κάθε μία ώρα. Το MOCAGE – accident έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να τρέξει για οποιοδήποτε σημείο πάνω στη γη και έχει πολύ καλή οριζόντια ανάλυση της τάξης των 0.5°. Επίσης έχει 20 επίπεδα διαστρωμάτωσης της στρατόσφαιρας και άλλα 20 για την τροπόσφαιρα γεγονός που το καθιστά ικανό να προβλέψει την κίνηση σωματιδίων πρακτικά από μερικά μέτρα από την επιφάνεια μέχρι χιλιάδες km πάνω από αυτή. Επίσης έχει τη δυνατότητα να τρέξει ανάστροφα τη διαδικασία ώστε να εντοπίσει την πηγή από την οποία προήλθε η έκρηξη με ακρίβεια θέσης και χρόνου.

#### 5.7.1.3 Λοιπά μοντέλα VATDM

Πέραν των μοντέλων που προαναφέρθηκαν που αφορούν τα VAAC London και Toulouse μελέτη σε προσομοιώσεις για την κίνηση και εναπόθεση της ηφαιστειακής τέφρας μετά από ηφαιστειακές εκρήξεις έχουν αναπτυχθεί και από άλλες ερευνητικές ομάδες στην Ευρώπη. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα MACC και PASODOBLE στο πλαίσιο του GMES που έχουν σχεδιαστεί να παρακολουθούν γενικώς τη σύσταση της ατμόσφαιρας, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιούνται και σε ηφαιστειακές εκρήξεις.

Το FLEXPART είναι ένα μοντέλο μεταφοράς που στηρίζεται στην επίλυση Lagrange αντίστοιχο με το NAME. Το FLEXPART υπολογίζει τις τροχιές των σωματιδίων τέφρας χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή του ανέμου και επιπρόσθετα μοντελοποιεί τυχαίες κινήσεις που προσομοιώνουν τοπικές ανωμαλίες. Επίσης αξιολογεί την υγρασία του περιβάλλοντος και των σωματιδίων καθώς και το μέγεθός τους και έχει τη δυνατότητα να προβλέψει την κίνησή τους. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει το πλεονέκτημα ότι έχει επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα των προβλέψεών του με πειράματα ηπειρωτικών διαστάσεων (Stohl A. M., 1998) και έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες που αφορούσαν μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλη κλίμακα.

Το REMOTE (Langmann, 2008) είναι ένα ακόμα μοντέλο πρόβλεψης για την κίνηση της ηφαιστειακής τέφρας σε τοπική κλίμακα που αναπτύχθηκε από το National

University of Ireland, Galway. Αποτελεί μοντέλο υδροστατικό και τρισδιάστατο που χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα από το European Centre of Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Η περιοδικότητα πρόβλεψης είναι και σ' αυτή την περίπτωση 6h. Το μοντέλο χρησιμοποιείται από κοινού με το πρόγραμμα χημείας RADM2 και το πρόγραμμα δυναμικής αερολυμάτων M7 και εξειδικεύεται στην πρόβλεψη της απόθεσης της τέφρας σε ξηρή ή υγρή κατάσταση.

**Πίνακας 6.** Μοντέλα VATDM (μεταφοράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας).

| Μοντέλο υπολογισμού | Οργανισμός που το χρησιμοποιεί   | Τύπος μοντέλου       | Πηγή                                     |
|---------------------|--|----------------------|--|
| <b>NAME</b>         | London VAAC  | Lagrangian           | (Ryall & Marion, 1998)                   |
| <b>HYSPLIT</b>      | Washington VAAC + Darwin VAAC + many others                            | Lagrangian           | (Draxler RR, 1998)                       |
| <b>PUFF</b>         | Alaska Volcano Observatory   | Lagrangian           | (Searcy C, 1998)<br>(Webley P. W., 2009) |
| <b>MLDP0</b>        | Montreal VAAC  | Lagrangian           | (D'Amours, 2010)                         |
| <b>MOCAGE</b>       | Toulouse VAAC  | semi-Lagrangian      | (Josse, 2004)                            |
| <b>FALL3D</b>       | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Vesuviano | Eulerian             | (Folch, 2009)                            |
| <b>FLEXPART</b>     | NILU (+ many others)   | Lagrangian           | (Stohl A. M., 1998) (Stohl A. C., 2005)  |
| <b>EURAD-IM</b>     | University Cologne   | Eulerian             | (Elbern, 2007)                           |
| <b>REMOTE</b>       | National University of Ireland   | Smolarkiewicz Scheme | (Langmann, 2008)                         |

Συγκεντρωτικά στον πίνακα που προηγήθηκε δίνονται συνοπτικά στοιχεία για τα μοντέλα που περιγράφηκαν προηγουμένως, όπως ο οργανισμός που τα χρησιμοποιεί, το είδος του μοντέλου και η αρχική του δημοσίευση από την ομάδα που το δημιούργησε. Συμπληρωματικά αναφέρονται και επιπλέον μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε άλλα VAAC πλην των ευρωπαϊκών και έχουν ευρεία χρήση.

### 5.7.2 Οδικός Χάρτης βελτίωσης των μοντέλων VATDM

Από τη συνοπτική περιγραφή κάποιων εκ των μοντέλων πρόβλεψης της μεταφοράς και απόθεσης ηφαιστειακής τέφρας (Volcanic Ash Transport and Dispersal Models – VATDM) που δόθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, αποδεικνύεται ότι πολλές και αξιόλογες προσπάθειες έχουν γίνει στον τομέα. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται έχουν θετικά και αρνητικά σημεία ως προς τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά και την ακρίβεια των προβλέψεων, ωστόσο τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων μοντελοποιήσεων εξακολουθούν να είναι σε πρώιμο στάδιο, καθώς κανένα εξ' αυτών δεν έχει συγκεντρώσει ικανό αριθμό πλεονεκτημάτων ώστε να υιοθετηθεί απόλυτα από την επιστημονική κοινότητα. Στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε μια συνολική θεώρηση του ζητήματος της πρόβλεψης, εστιάζοντας στα σημεία που υπάρχει περιθώριο βελτίωσης και προτείνοντας λύσεις και κατευθύνσεις για την απαραίτητη σύγκλιση και

αναβάθμιση των μοντέλων VATDM και του ρόλου τους στην αντιμετώπιση καταστάσεων κρίσης λόγω ηφαιστειακών εκρήξεων. Συγκεκριμένα θα επικεντρωθούμε στους εξής τομείς

- Μοντελοποίηση της διασποράς ηφαιστειακής τέφρας
- Μείωση των στοιχείων ασάφειας
- Συνδυασμός μοντέλων πρόβλεψης και παρατηρήσεων

#### 5.7.2.1 Μοντελοποίηση της διασποράς ηφαιστειακής τέφρας

Αναφορικά με τη μοντελοποίηση της διασποράς απαιτείται να καθοριστεί ο τρόπος χαρακτηρισμού της πηγής του φαινομένου. Τα στοιχεία πρέπει να έχουν κοινή περιγραφή και να αφορούν το ρυθμό έκρηξης μάζας (Mass Eruption Rate – MER), την κατακόρυφη κατανομή μάζας και μεγέθους σωματιδίων, το ύψος της στήλης έκρηξης, τη συνολική κατανομή σωματιδίων (Total Grain Size Distribution – TGSD) με βάση το μέγεθός τους και τις λοιπές ιδιότητες (πυκνότητα, σχήμα κλπ), το χρόνο έναρξης και λήξης της έκρηξης, τη γεωγραφική θέση της πηγής του νέφους και το ποσοστό της ψιλής τέφρας – σκόνης. Ιδιαίτερος τα στοιχεία που αφορούν κοκκομετρία και κατανομή μαζών και σωματιδίων (TGSD) θα μπορούσαν να εξαχθούν εμμέσως μέσα από την πιο ενδελεχή αποτύπωση της δυναμικής της στήλης έκρηξης.

Γενικά πρέπει να παρατηρήσουμε ότι οι μονοδιάστατες (1D) μοντελοποιήσεις απέχουν σε ακρίβεια και ενσωματώνουν λιγότερη ευφυΐα, ωστόσο υπερτερούν σε χρόνο εκτέλεσης ως προς τις 3D μοντελοποιήσεις. Θα ήταν σκόπιμο να υπάρξουν συγκριτικοί έλεγχοι μοντέλων 3D και 1D, ώστε να καθοριστούν τα διαστήματα εμπιστοσύνης και ενδεχομένως να εξαχθούν παράμετροι βελτίωσης των μοντέλων 1D για να προσεγγίζουν την εξέλιξη του φαινομένου ακριβέστερα. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα μοντέλα 1D εστιάζεται στην αντιμετώπιση σύνθετων μετεωρολογικών φαινομένων, όπως το crosswind με απλοποιημένους και ταχύς αλγορίθμους. Σε όλα τα χαρακτηριστικά της ηφαιστειακής έκρηξης πρέπει να προταθούν και υιοθετηθούν πρότυπα αναφοράς, περιγραφής και μελέτης ώστε τα μοντέλα να δουλεύουν επί ιδίων εισόδων. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται επί του παρόντος στις προβλέψεις σε μεγάλο βαθμό οφείλονται στην ελλιπή περιγραφή των εισόδων του κάθε μοντέλου.

Η συσσωμάτωση σωματιδίων ηφαιστειακής τέφρας και η έκθεσή τους σε υγρασία αποτελούν δυο διαδικασίες που δεν έχουν μοντελοποιηθεί με ακρίβεια προς το παρόν ως προς τα αποτελέσματα που επιφέρουν στη διαδικασία μεταφοράς και εναπόθεσης της τέφρας και αποτελούν σημαντική πηγή απόκλισης των μοντέλων από τα πραγματικά δεδομένα. Πειραματική έρευνα και παρατηρήσεις στο πεδίο είναι το δίπτυχο που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανάπτυξη και βαθμονόμηση των μοντέλων που περιγράφουν τη συσσωμάτωση σωματιδίων τέφρας σε συνθήκες υγρασίας και μη.

#### 5.7.2.2 Μείωση των στοιχείων ασάφειας και της επίδρασής τους

Η ασάφεια που υπάρχει εγγενώς στα μοντέλα πρόγνωσης της μεταφοράς και εναπόθεσης της ηφαιστειακής τέφρας είναι ο παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβειά τους στο μέγιστο βαθμό. Η ανάπτυξη των μοντέλων στο μέλλον πρέπει να γίνει με



γνώμονα την ελαχιστοποίηση του επηρεασμού των αποτελεσμάτων από τα στοιχεία της ασάφειας.

Συγκεκριμένα τόσο τα στοιχεία χαρακτηρισμού της πηγής του φαινομένου (MER, TGSD κλπ), όσο και των μετεωρολογικών μοντέλων (Numerical Weather Prediction – NWP) που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο σύστημα έχουν μεγάλο βαθμό ασάφειας, τόσο λόγω σφαλμάτων και περιορισμών στις μετρήσεις όσο και λόγω του γεγονότος ότι τμήμα των δεδομένων εισόδου των μοντέλων VATDM αποτελεί πρόγνωση των μοντέλων NWP(πχ. μετεωρολογική πρόγνωση).

### 5.7.2.3 Συνδυασμός μοντέλων πρόβλεψης και παρατηρήσεων

Στον τομέα του συνδυασμού μοντέλων πρόβλεψης υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης του συστήματος, δεδομένου ότι τα μοντέλα που αναπτύσσονται είναι αυτόνομα με μηδαμινά επίπεδα συνεργατικής λειτουργίας. Η συνδυαστική λειτουργία των μοντέλων αποτελεί πρόκληση στο ερευνητικό πεδίο, καθώς προϋποθέτει αφενός την ομογενοποίηση των εισόδων των συστημάτων και αφετέρου την ομογενοποίηση των εξόδων – αποτελεσμάτων τους. Η συνεργατική λειτουργία των μοντέλων VATDM και NWP έχει εξεταστεί στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ENSEMBLE.

Οι πραγματοποιούμενες μελέτες επί αντίστοιχων συστημάτων πρόβλεψης τα οποία έχουν ενοποιηθεί για αξιολόγηση και εξαγωγή συμπερασμάτων από κοινού, καθιστούν εξαιρετικά πιθανό το ενδεχόμενο ο συνδυασμός τόσο των μοντέλων VATDM όσο και των μοντέλων NWP να οδηγήσει σε ακριβέστερα και λιγότερο ασαφή αποτελέσματα. Η αξιολόγηση και σύνθεση των εξόδων των μοντέλων μέσα από ντετερμινιστικό ή στοχαστικό μοντέλο θα μπορούσε να βελτιώσει τις επιδόσεις της πρόβλεψης.

Στον ίδιο τομέα της βελτίωσης των μοντέλων, είναι σκόπιμο να δοθεί έμφαση στην αξιολόγηση και βαθμονόμηση των εξόδων των συστημάτων μέσα από συνεχή παρακολούθηση και μέτρηση σε πραγματικό χρόνο των μεγεθών που εξήχθησαν από τη διαδικασία της πρόβλεψης. Η διαδικασία της μέτρησης σε πραγματικό χρόνο πρέπει σε περιόδους κρίσεων να ενεργοποιεί ad hoc πρόσθετους ελέγχους και οι έξοδοι των μοντέλων με τις μετρήσεις πρέπει να συναξιολογούνται με στόχο να μειώνεται η ασάφεια και να βελτιώνεται η ακρίβεια των εξόδων των μοντέλων πρόβλεψης.

Προκειμένου να επιλεγούν τα κατάλληλα μοντέλα για την εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων πρέπει να προηγηθεί η αντικειμενική αξιολόγηση των σημαντικότερων εξ' αυτών από την επιστημονική κοινότητα. Αξιολογή προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση ήταν η συγκριτική μελέτη (Witham & Hort, 2007), ενώ μια ακόμα πιο μεγάλης κλίμακας συγκριτική μελέτη παρουσιάστηκε στο (Bonadonna, Folch, Loughlin, & Puempel, 2011) με την αξιολόγηση 12 μοντέλων VATDM και την αξιολόγηση πλειάδας συστημάτων αντίχτυπος τέφρας. Τα αποτελέσματα σχετικά με τα μοντέλα VATDM συνοψίζονται στον πίνακα 7 (Bonadonna, Folch, Loughlin, & Puempel, 2011).

Πίνακας 7. Μοντέλα VATDM και συγκριτική τους θεώρηση (Bonadonna, Folch, Loughlin, & Puempel, 2011).

|                      | ASH3D | ATHAM | FALL3D | FLEXPART   | HVSPPLIT    | JMA         | MLDP0     | MOCAGE  | NAME   | PUFF     | TEPHRA2 | VOL-CALPUFF |
|----------------------|-------|-------|--------|------------|-------------|-------------|-----------|---------|--------|----------|---------|-------------|
| Operational          |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Approach (1)         | E/H   | E     | E      | L          | H           | L           | L         | E       | L      | L        | E       | H           |
| Method (2)           | N     | N     | N      | N          | N           | N           | N         | N       | N      | N        | A       | S           |
| Coverage (3)         | LRG   | L     | LR     | LRG        | LRG         | G           | LRG       | G       | LRG    | LRG      | L       | LR          |
| <b>Physics</b>       |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Topography           |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| H wind advection     |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| V wind advection     |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| H atm. diffusion     |       |       |        |            |             |             |           | See (5) |        |          |         |             |
| V atm. diffusion     |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Particle sed.        |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Other dry dep.       |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Wet deposition       |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Dry part. aggr.      |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Wet part. aggr.      |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Particle shape       |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Gas species          |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Chemic. processes    |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| <b>Granulometry</b>  |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Variable size class. |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Variable GS distr.   |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Variable size limits |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| <b>Source term</b>   |       |       |        |            |             |             |           |         |        |          |         |             |
| Mass distribution(4) | LN    | O     | ALL    | PS/L/U/P/O | PS/L/U/P/LN | PS/L/U/P/LN | PS/L/U/LN | PS/L    | PS/L/O | PS/L/U/P | L/U/LN  | PS/BP       |

(1) L=Lagrangian, E=Eulerian, H=Hybrid

(2) A=Analytical, S=semi-analytical, N=Numerical

(3) L=Local, R=Regional, G=Global

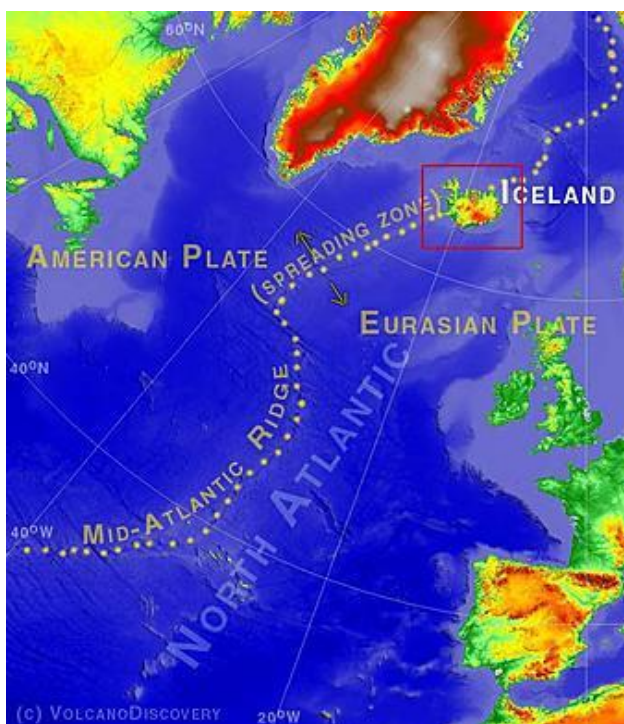
(4) PS=Point Source, L=Linear, U=Umbrella-type, P=Poisson, LN=Log-normal, BP=Buoyant Plume, O= Other (see Appendix).

(5) Neglected. Diffusion of numerical origin appears to be sufficient, with particularly good results at 0.5°.

## 6 Η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull στις 14 Απριλίου 2010

### 6.1 Συνοπτικό Ιστορικό

Η Ισλανδία βρίσκεται στη γραμμή της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού. Οι μεσοωκεάνιες ράχες βρίσκονται σε αποκλίνοντα όρια λιθосφαιρικών πλακών, κατά μήκος των οποίων συντελείται συνεχής διείσδυση μάγματος ασθενοσφαιρικής προέλευσης και έκχυση λάβας στους ωκεάνιους πυθμένες. (Παπανικολάου & Σίδερης, 2008). Αναφορικά με την Ισλανδία πρόκειται για το όριο μεταξύ δύο λιθосφαιρικών πλακών, της πλάκας της βόρειας Αμερικής και της ευρασιατικής πλάκας. Το ενεργό ηφαίστειο Eyjafjallajökull (Εϊγιαφιατλαγιόκουτλ), ύψους 1666m με διάμετρο κρατήρα 2.5km, βρίσκεται στα νότια του νησιού σε απόσταση 125km ανατολικά της πρωτεύουσας της χώρας Ρέικιαβικ. Με το ίδιο όνομα αναφέρεται και ο παγετώνας που καλύπτει τον ηφαιστειακό όγκο και εκτείνεται σε έκταση 100km<sup>2</sup> καταλήγοντας κοντά στις ακτές του Ατλαντικού. Πρόκειται για τον 6ο μεγαλύτερο σε έκταση παγετώνα της Ισλανδίας (Iceland on the web).



**Εικόνα 46.** Η Ισλανδία βρίσκεται στη γραμμή της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού (Case Study: Eyjafjallajökull, Iceland 2010)

Καταγραφή για τη δραστηριότητα του ηφαιστείου έχουμε από τον 9ο αιώνα, περίοδο της εγκατάστασης των πρώτων κατοίκων στην Ισλανδία. Το ηφαίστειο εξερράγη τα έτη 902, 1612, και από το 1821 ως το 1823 οπότε και προκάλεσε έκρηξη συνοδευόμενη από παγετώδη πλημμύρα (Iceland\_review, 2010).

Τα τελευταία είκοσι χρόνια το ηφαίστειο Eyjafjallajökull έχει παρουσιάσει ενδείξεις εντονης δραστηριότητας που εκδηλώνονται με διακριτά σεισμικά περιστατικά το 1994, 1996, 1999 και 2009-2010. Τα περιστατικά του 1994 και 1999 σχετίζονται με

σημαντική παραμόρφωση του φλοιού, γεγονός που αποτελεί συνέπεια του ρηχού εστιακού βάρους της δόνησης (4 – 6km). Το επεισόδιο του 2010 ξεκίνησε με ένταση παρόμοια με τα προγενέστερα, ωστόσο κατέληξε σε μια έκρηξη αλκαλιοβασαλτικής λάβας στην ανατολική πλευρά του ηφαιστείου στις 20 Μαρτίου 2010. Η δραστηριότητα αυτή συνεχίστηκε μέχρι τις 12 Απριλίου και δημιούργησε δύο εκβολές και μια μικρή ροή λάβας όγκου περίπου 0.02km<sup>3</sup>. Ωστόσο, δύο μέρες αργότερα και μετά από έντονη σεισμική δραστηριότητα ξεκίνησε από τον κρατήρα κορυφής η έκρηξη της 14<sup>ης</sup> Απριλίου. Η συμπίεση οδήγησε στο σπάσιμο του πάγου που κάλυπτε τον κρατήρα και οι λιωμένοι πάγοι αναμείχθηκαν με το αναδύμενο μάγμα. Η επαφή του μάγματος με το κρύο νερό των λιωμένων πάγων οδήγησαν στην έκρηξη μεγάλων όγκων πολύ λεπτόκοκκης τέφρας που ανήλθαν στην ατμόσφαιρα. Αυτός ο τύπος έκρηξης καλείται φρεατομαγματική έκρηξη. Η φρεατομαγματική φάση της έκρηξης ολοκληρώνεται είτε όταν εξαντλείται η παροχή νερού είτε όταν το ηφαίστειο επανακτήσει την αρχική του δομή. Στις 25 Απριλίου η Ισλανδική Μετεωρολογική Υπηρεσία ανέφερε ότι το εξωτερικό νερό των πάγων δεν είχε επηρεάσει ιδιαίτερα την δραστηριότητα της έκρηξης από τις 18 Απριλίου και μετά, γι' αυτό και η δραστηριότητα χαρακτηρίστηκε πλέον κυρίως μαγματική και όχι φρεατομαγματική. Επιπλέον, η τέφρα που πλέον παραγόταν ήταν χονδρόκοκκος. Η ροή λάβας ξεκίνησε την 21<sup>η</sup> Απριλίου. Από τον Μάιο και μετά η δραστηριότητα άλλαξε σε μια ήπια αλλά σταθερή έκρηξη μάγματος, η οποία παράγει σημαντικές ποσότητες φυσαλιδώδους τέφρας και κησιρόλιθων. Ωστόσο, η λεπτή τέφρα δεν ερχόταν πλέον σε επαφή με νερό με αποτέλεσμα να καταλήγουν μεγαλύτερες ποσότητες τέφρας εντός του νέφους και να διασκορπίζονται ευρέως. Το επίπεδο δραστηριότητας πέρασε διάφορες διακυμάνσεις εντός του Μαΐου έως τις 23 Μαΐου οπότε πλέον η παραγωγή τέφρας θεωρήθηκε ελάχιστη. (Peter Sammonds, 2010)

Η έκρηξη του Eyjafjallajökull θεωρείται η δεύτερη μεγαλύτερη έκρηξη στην Ισλανδία μετά από αυτήν του ηφαιστείου Hekla το 1947. Τα τελευταία σαράντα χρόνια έχουν σημειωθεί οκτώ εκρήξεις στην Ισλανδία με αποτέλεσμα νέφος τέφρας να καλύπτει μεγάλο ποσοστό της χώρας. Οι τέσσερις από τις προαναφερθείσες εκρήξεις ήταν μαγματικές (Hekla 1971, 1980, 1991 και 2000) και οι τρεις φρεατομαγματικές (Gjálp 1996 και Grimsvotn 1998 και 2004). Η έκρηξη του Eyjafjallajökull είχε και τις δύο μορφές, δηλαδή ξεκίνησε ως φρεατομαγματική και οι υπόλοιπες φάσεις της ήταν μαγματικές. Σε έξι από τα οκτώ προαναφερθέντα περιστατικά (Hekla 1971, 1980, 1991, 2000, Gjálp 1996, Grimsvotn 2004) τα νέφη της τέφρας διασκορπίστηκαν προς τα βόρεια και βορειοανατολικά πάνω από την Αρκτική και κατά συνέπεια δεν είχαν παρά ελάχιστο αντίκτυπο στην εναέρια κυκλοφορία.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι φρεατομαγματικές εκρήξεις, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και μελλοντικές εκρήξεις που ενδέχεται να προκύψουν από το ενεργό ηφαίστειο Katla που είναι επίσης καλυμμένο με πάγο, έχουν την δυνατότητα να πλήξουν σημαντικά την εναέρια κυκλοφορία. Αυτό συμβαίνει διότι τέτοια γεγονότα παράγουν σημαντικές ποσότητες τέφρας και μπορεί να διαρκέσουν από ημέρες έως εβδομάδες. Στην περίπτωση του Απριλίου 2010 έπαιξε ωστόσο ρόλο και το πολύ μικρό

μέγεθος κόκκου, το οποίο διευκόλυνε την μακρά διασπορά της τέφρας και τις εκτεταμένες συνέπειες για την αεροναυτιλία. (Zehner, 2010)

## 6.2 Γενική επισκόπηση της έκτασης της κρίσης

Η έκρηξη της 14<sup>ης</sup> Απριλίου στο ηφαίστειο Eyjafjallajökull στην Ισλανδία προκάλεσε ένα άνευ προηγουμένου κλείσιμο του εναέριου χώρου του Ηνωμένου Βασιλείου, πολλών ευρωπαϊκών χωρών καθώς και του βόρειου Ατλαντικού. Παρόλο που το Eyjafjallajökull θεωρείται ένα ηφαίστειο «δεύτερης κατηγορίας» αποδείχθηκε ικανό να εκτοξεύσει 300m<sup>3</sup> και 750tn λάβας το δευτερόλεπτο, υψώνοντας στον ουρανό μια στήλη τέφρας που σε τρεις ημέρες έφτασε τα 140×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Η στήλη ξεπέρασε σε ύψος τα 10km για να μειωθεί στη συνέχεια στα 4000m με 5000m. Οι εγκυμονούντες κίνδυνοι για τα αεροσκάφη σε μια τέτοια κατάσταση είναι πολλοί. Πέρα από το γεγονός ότι η σκόνη και η τέφρα του ηφαιστειακού νέφους είναι επιζήμια για τις μηχανές, τους κινητήρες ακόμα και για το σκελετό των αεροσκαφών, μέσα στη στήλη της τέφρας η ατμόσφαιρα έχει τόσο ηλεκτρικό φορτίο που προκαλείται ένας θεαματικός κεραυνός κάθε ένα τέταρτο της ώρας (Δημητρολόπουλος, 2010).

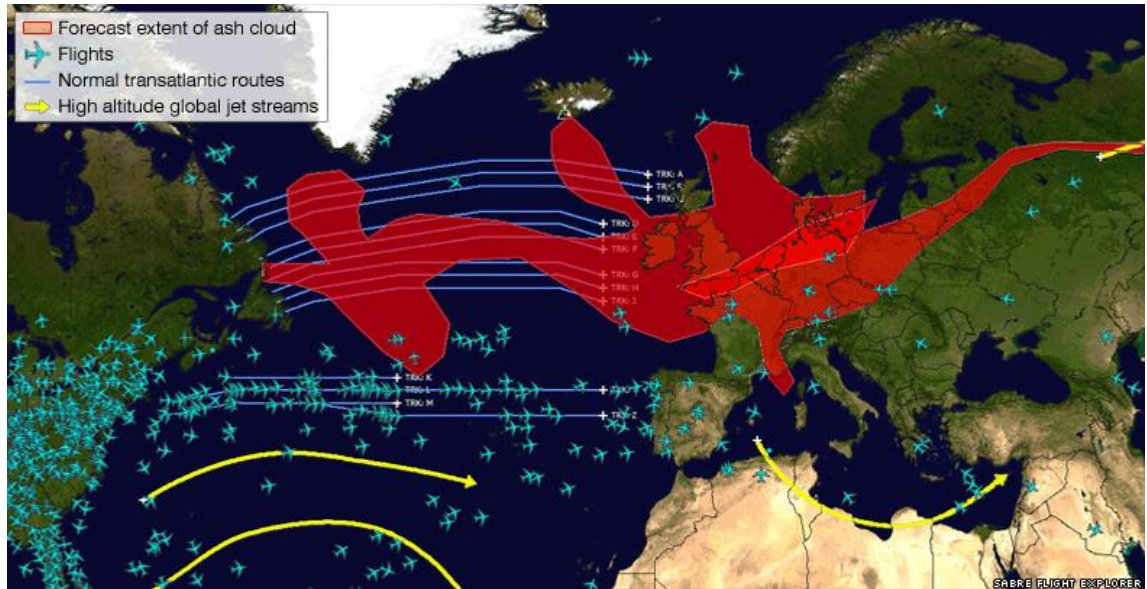


**Εικόνα 47. α)** Ηφαιστειακό νέφος πλούσιο σε ατμό την πρώτη μέρα της έκρηξης του Eyjafjallajökull 14 Απριλίου 14:27. Όψη από την βόρεια πλευρά. Φωτογραφία: Armann Höskuldsson (Zehner, 2010) **β)** Κεραυνός κατά τη διάρκεια της έκρηξης του Eyjafjallajökull λόγω του ηλεκτρικού φορτίου στη στήλη τέφρας.

Αναμφισβήτητα η έκρηξη επηρέασε τις οικονομικές, πολιτικές και πολιτιστικές δραστηριότητες της Ευρώπης αλλά και ολόκληρου του κόσμου. Αναφορικά με τις ανησυχίες ότι η τέφρα ενδέχεται να καταστρέψει τις μηχανές των αεροσκαφών το σύστημα προειδοποίησης που συνετάχθη από το Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) ήταν επιτυχές στο να αποτρέψει τα αεροσκάφη να πετούν μέσα από νέφη επικίνδυνης τέφρας. Ο εναέριος χώρος πολλών χωρών έκλεισε με αποτέλεσμα να οδηγηθούμε στην μεγαλύτερη διακοπή εναέριας κυκλοφορίας μετά τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο. Οι ακυρώσεις των πτήσεων προκάλεσαν τον αποκλεισμό εκατομμυρίων επιβατών όχι μόνο στην Ευρώπη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο.

Αρχικά, είχαμε ένα πλήρες και συνεχές κλείσιμο του μεγαλύτερου τμήματος του εναέριου χώρου της Βόρειας Ευρώπης από τις 15 έως τις 21 Απριλίου, οπότε και άρθηκαν οι περιορισμοί στην Ευρώπη λόγω της θέσπισης νέων ορίων αναφορικά με τα ασφαλή όρια πυκνότητας της ηφαιστειακής τέφρας στον αέρα (Zehner, 2010). Ωστόσο,

μεγάλο θέμα προς διερεύνηση αποτελεί πλέον η εύρεση του κατάλληλου και ασφαλούς τρόπου χειρισμού παρόμοιων καταστάσεων, η θέσπιση των ορίων τέφρας που είναι ασφαλή για πτήσεις καθώς και τον αρμόδιο φορέα, οργανισμό που είναι σε θέση να καθορίσει με ασφάλεια τις τιμές που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαχείριση του κινδύνου. (Peter Sammonds, 2010)



**Εικόνα 48.** Γενική επισκόπηση της έκτασης του ηφαιστειακού νέφους και των περιοχών που επλήγησαν από την απαγόρευση πτήσεων (Iceland volcano in maps, 2010)

Παρόλο, που το μέτρο της απαγόρευσης πτήσεων στέφθηκε με επιτυχία όσον αφορά την ασφάλεια των πτήσεων, πληθαίνουν οι ενστάσεις σε σχέση με το αν το μέτρο αυτό είναι υπερβολικό και αν θα ήταν εξίσου ασφαλές εάν αντί της πλήρους ακύρωσης επιτρέπονταν η πραγματοποίηση ορισμένων πτήσεων σε περιοχές με χαμηλά επίπεδα τέφρας. Θεωρήθηκε ότι η απόλυτη στάση του ICAO «όπου υπάρχει τέφρα δεν πετάμε» θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς προβλήματα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής όπου μπορούν να βρεθούν εναλλακτικά δρομολόγια για τις πτήσεις, αντίθετα στην Ευρώπη ένα ηφαιστειακό νέφος ενδεχομένως αρκεί να καλύψει όλα τα βασικά αεροδρόμια και να οδηγήσει σε «πάγωμα» της αεροναυτιλίας. Ουσιαστικά, οι αναταραχές και οι ακυρώσεις πτήσεων σε διάφορες χώρες της Ευρώπης ξεκίνησαν στις 15 Απριλίου και μπορούμε να πούμε ότι η κατάσταση ομαλοποιήθηκε οριστικά μετά τις 17 Μαΐου. Η Διεθνής Ένωση Αεροπορικών Μεταφορών (International Air Transport Association – IATA) εκτίμησε ότι η παγκόσμια αεροπορική βιομηχανία έχασε την περίοδο της διακοπής περίπου 148Μ € την ημέρα (2.5 bn € συνολικά). Υπήρξε επίσης μια ευρύτερη επίπτωση στις οικονομίες διαφόρων χωρών, των οποίων η οικονομία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αεροπορικές εξαγωγές (πχ. Κένυα). Αναφέρθηκαν ελλείψεις σε εισαγόμενα λουλούδια, φρούτα καθώς και ηλεκτρονικό υλικό τις μέρες αμέσως μετά τη διακοπή.

### 6.3 Ανάλυση της εξέλιξης του φαινομένου

Το Eyjafjallajökull όπως προαναφέρθηκε είναι ένα στρωματοηφαίστειο σε υψόμετρο 1666m με κρατήρα πλάτους περίπου 2.5km. Βρίσκεται στη νότια Ισλανδία και καλύπτεται από κάλυμμα πάγου πάχους 70m – 200m και έκτασης περίπου 100km<sup>2</sup>. Πριν την έκρηξη του Απριλίου είχε προηγηθεί σεισμική δραστηριότητα τον Δεκέμβριο του 2009 καθώς και εκροή λάβας από το Fimmvörðuháls μέσω μιας σχισμής που δεν καλυπτόταν από πάγο.

Λεπτομερέστερα, ήδη έως τις 19 Μαρτίου οι επιστήμονες μελετώντας την τεκτονική δραστηριότητα είχαν ανιχνεύσει μικρές σεισμικές δονήσεις προκαλούμενες από το μάγμα που διακινούνταν μέσω ρωγμών στον φλοιό της γης και προέβλεψαν τότε την επερχόμενη έκρηξη. Όντως στις 20 Μαρτίου το μάγμα βρήκε διέξοδο στην επιφάνεια από μια ηφαιστειακή σχισμή μήκους 0.5km στο Fimmvörðuháls εξήλθε λάβα. Η περιοχή είναι βραχώδης και βρίσκεται μεταξύ των παγετώνων Eyjafjallajökull και Mýrdalsjökull. Η έκρηξη δημιούργησε εντυπωσιακές ροές λάβας πάνω από τον πάγο και γι' αυτό το λόγο δεν υπήρχε κίνδυνος πλημμύρας. Πολλοί επιστήμονες αλλά και τουρίστες έσπευσαν να δουν τις παγωμένες διαδρομές που δημιουργούνταν πάνω στην τέφρα που κάλυπτε τον παγετώνα.



**Εικόνα 49.** Ταινίες «πάγου» επάνω στον παγετώνα Eyjafjallajökull, ο οποίος είναι καλυμμένος από τέφρα (Eyjafjallajökull case study).

Έως το τέλος του Μαρτίου 2010 λάβα και μελανόλιθος είχαν καλύψει ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο και πολλοί πίστεψαν ότι η έκρηξη έχει πλέον τελειώσει. Ωστόσο, στις 12 Απριλίου άνοιξε μια δεύτερη ηφαιστειακή σχισμή και μετρήθηκε σεισμική δόνηση μεγέθους 3.2 βαθμών της κλίμακας Richter σε μικρό εστιακό βάθος, γεγονός που καταδείκνυε ότι το μάγμα βρισκόταν πάλι σε κίνηση. Δύο ημέρες αργότερα, στις 14 Απριλίου και ώρα 1.15am και μετά από έντονη σεισμική δραστηριότητα το ηφαίστειο εξερράγη. Αρχικά η δραστηριότητα ήταν κάτω από τον πάγο, όμως λίγες ώρες αργότερα η σχισμή άνοιξε διαπερνώντας 200 m πάγου και τεράστια ποσότητα λευκού καπνού που περιείχε κυρίως ατμό αλλά και τέφρα ανυψώθηκε στην ατμόσφαιρα.

Ακολούθησε μιας μεγάλης κλίμακας πλημμύρα που προήλθε από την τήξη των πάγων και έφθανε μέχρι τις πεδιάδες στην βόρεια πλευρά του ηφαιστείου. Την ίδια ώρα μια μικρότερης έκτασης πλημμύρα έπληττε τη νότια πλευρά του ηφαιστείου. Αργότερα την ίδια ημέρα η δραστηριότητα του ηφαιστείου εντάθηκε, ώσπου τις απογευματινές ώρες ένα μαύρο νέφος πλούσιο σε τέφρα εξήλθε από τις ενεργές εξόδους. Ακολούθησε μια φρεατομαγματική έκρηξη, η οποία οδήγησε σε μια μέση απελευθέρωση μάγματος αρκετών εκατοντάδων τόνων το δευτερόλεπτο και στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων τέφρας τραχυανδευσιτικής σύστασης (εκχυτικά πυριγενή πετρώματα στα οποία κυρίαρχα συστατικά είναι τα αλκάλια). Αυτή η φάση της έκρηξης σχημάτισε μία στήλη νέφους ύψους 5–9km και διήρκεσε μέχρι τα μεσάνυχτα της 17<sup>ης</sup> Απριλίου.



**Εικόνα 50.** Η έκρηξη του Eyjafjallajökull καθώς και η στήλη τέφρας την 17<sup>η</sup> Απριλίου. (Jens Hesselbjerg Christensen, Danish Met Institute) (Mylné, 2010).

Οι άνεμοι που επικρατούσαν στην περιοχή μετέφεραν το πλούσιο σε τέφρα νέφος προς νοτιοανατολικά και νότια και ακολούθως πάνω από όλη την Ευρώπη, γεγονός που δημιούργησε έντονα προβλήματα στην αεροναυτιλία. Την 18η Απριλίου υπήρξε μια μείωση στην ένταση της έκρηξης καθώς και στις ποσότητες παραγόμενης τέφρας. Αυτή η κατάσταση της δραστηριότητας συνεχίστηκε μέχρι τις 4 Μαΐου. Στο διάστημα 3-5 Μαΐου υπήρξε νέα σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή που οδήγησε εκ νέου σε αυξημένες εκροές νέφους από το ηφαίστειο ύψους 5–9km. Ωστόσο, η νέα αυτή αναζωπύρωση δεν οδήγησε σε περαιτέρω αναστάτωση στην εναέρια κυκλοφορία στην Ευρώπη (Zehner, 2010).

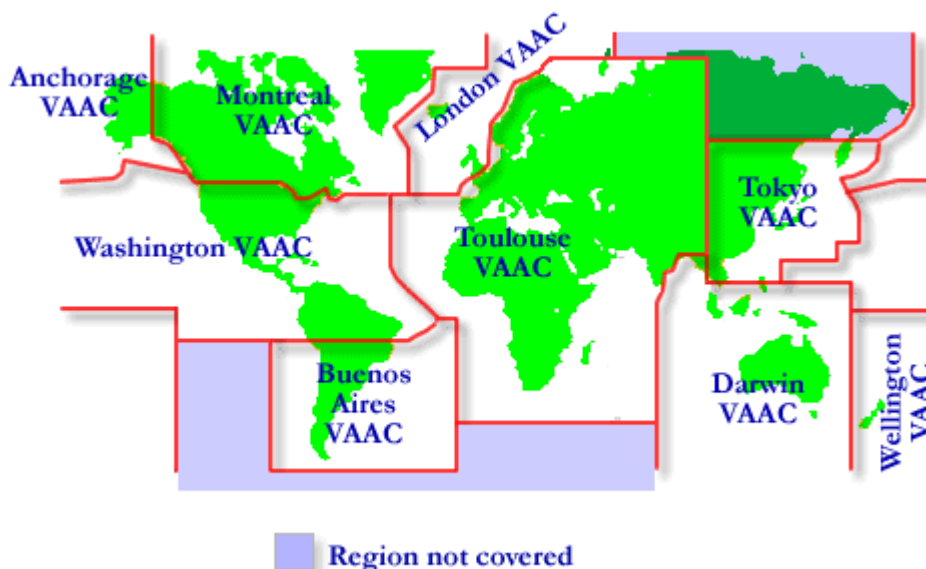
Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι το φαινόμενο της έκρηξης του Eyjafjallajökull χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση το μάγμα ερχόταν σε επαφή με τον πάγο που βρισκόταν πάνω από τον κρατήρα και οδηγούσε στην παραγωγή τέφρας. Σταδιακά



ωστόσο, οι πάγοι έλιωσαν οπότε υπήρχε όλο και λιγότερο νερό για να αντιδράσει με το μάγμα και να σχηματίσει τέφρα. Έτσι το φαινόμενο πέρασε στη δεύτερη φάση του, στη διάρκεια της οποίας είχαμε κυρίως παραγωγή λάβας και όχι τέφρας.

### 6.3.1 Μετεωρολογικά στοιχεία

Αναμφισβήτητα, οι μετεωρολογικές συνθήκες την περίοδο της έκρηξης του ηφαιστείου είχαν σημαντική επίδραση τόσο στη διασπορά του νέφους όσο και στις επιπτώσεις αυτού στην αεροναυτιλία. Κατά την διάρκεια της κύριας περιόδου αποκλεισμού ενός μεγάλου μέρους του ευρωπαϊκού εναέριου χώρου, δηλαδή από τις 15 έως τις 23 Απριλίου 2010 κυριαρχούσε βόρεια και βορειοδυτική ροή αέρα μεταξύ της Ισλανδίας και της Βορειοδυτικής Ευρώπης. Οι συνθήκες αυτές δεν είναι οι τυπικές για την περιοχή αυτή, ωστόσο δεν μπορούν να χαρακτηριστούν και ως ιδιαίτερα ασυνήθιστες. Η ανάλυση, βάσει στοιχείων του Διεθνούς Κέντρου Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης / Διεθνούς Κέντρου Ατμοσφαιρικών Ερευνών (National Centers for Environmental Prediction-NCEP / National Center for Atmospheric Research – NCAR), της συνήθους κατεύθυνσης των ροών αέρα, χρησιμοποιώντας μέσες τιμές (300–700mb), δείχνει ότι η επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων είναι νοτιοδυτική (Kalnay, 1996). Εάν ίσχυε κάτι τέτοιο την περίοδο της έκρηξης τότε το νέφος και η τέφρα θα μετακινούνταν προς την Ανταρκτική ή/και την Βόρεια Σκανδιναβία, οπότε θα ήταν πολύ μικρότερης κλίμακας οι επιπτώσεις στην αεροναυτιλία. Παρόμοιες καιρικές συνθήκες με αυτές που επικρατούσαν κατά την έκρηξη εμφανίζονται με συχνότητα περίπου 8% του χρόνου. Επειδή τα καιρικά φαινόμενα αναλύονται σε μηνιαία βάση, το ποσοστό αυτό δεν σημαίνει ότι τέτοια καιρικά φαινόμενα επικρατούν το 8% του μήνα, αλλά ότι συναντώνται σε αυτό το ποσοστό στο σύνολο των μηνών (Peter Sammonds, 2010).



**Εικόνα 51.** Περιοχές ευθύνης των επιμέρους Συμβουλευτικών Κέντρων Ηφαιστειακής Τέφρας (VAACs). Η Ισλανδία ανήκει στο London VAAC. (London\_MWO, 2010)

Κατά την περίοδο της έκρηξης η αντίδραση της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας του Ηνωμένου Βασιλείου (MWO) υπήρξε άμεση. Μάλιστα, η Μετεωρολογική υπηρεσία του Ηνωμένου Βασιλείου αποτελεί και ένα από τα εννέα Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας (Volcanic Ash Advisory Center – VAAC), το οποίο λειτουργεί με σκοπό την πρόβλεψη καθώς και την παραγωγή μοντέλων προσομοίωσης διαφόρων καταστάσεων για την πολιτική αεροπορία. Τα Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, έχουν σχεδιαστεί από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Authority-ICAO) και υποστηρίζονται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) και ο ρόλος τους είναι σε περιπτώσεις εκρήξεων ηφαιστειών να ενημερώνουν για την κίνηση και την διασπορά της ηφαιστειακής τέφρας, να σχεδιάζουν μοντέλα προσομοίωσης, να παρακολουθούν το νέφος τέφρας μέσω δορυφόρων και τελικά να παρέχουν συμβουλευτικές υπηρεσίες στην εναέρια κυκλοφορία.

Στην περίπτωση του Eyjafjallajökull δημιουργήθηκαν νέα μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης του νέφους καθώς και υπολογισμού συγκέντρωσης τέφρας στην ατμόσφαιρα.

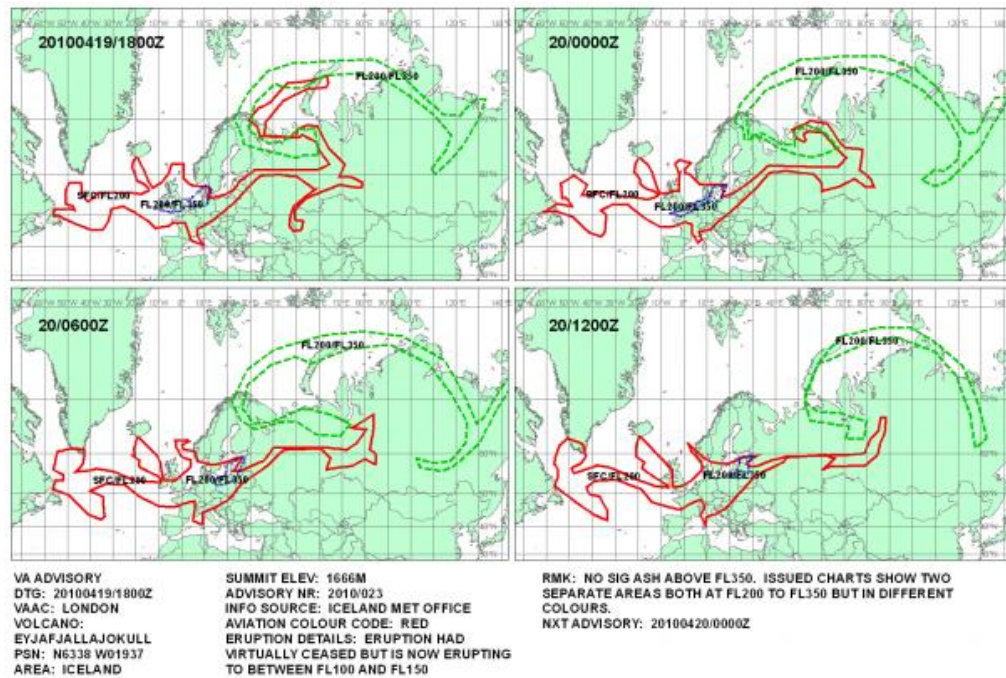
Μάλιστα, ενώ η αρχική οδηγία του ICAO ήταν η πλήρης αποφυγή της τέφρας, στις 19.04.10 οι κανόνες άλλαξαν, ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση τέφρας πάνω από  $2000\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Έτσι αποτυπώθηκε η συγκέντρωση τέφρας σε διαγράμματα, τα οποία σε συνδυασμό με τις κατευθύνσεις του VAAC μπορούσαν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στην πολιτική αεροπορία για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της κρίσης. (London\_MWO, 2010)

### 6.3.2 Χρονική αποτύπωση του ηφαιστειακού νέφους

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα υπεύθυνος οργανισμός για την παροχή πληροφοριών στις Αεροπορικές Αρχές αναφορικά με το νέφος τέφρας στην περίπτωση έκρηξης ηφαιστείου, όπως για παράδειγμα η συγκέντρωση του νέφους, η διεύθυνση της κίνησής του και η ταχύτητα διασποράς, είναι το Συμβουλευτικό Κέντρο Ηφαιστειακής Τέφρας (VAAC) στο οποίο ανήκει η περιοχή της έκρηξης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, υπεύθυνος οργανισμός ήταν το Συμβουλευτικό Κέντρο Ηφαιστειακής Τέφρας του Λονδίνου (London VAAC). Αξίζει εδώ να επισημανθεί ότι το Κέντρο έχει αποκλειστικά συμβουλευτικό ρόλο, καθώς παρέχει μόνο πληροφορίες και στοιχεία για το νέφος τέφρας στις υπεύθυνες Αεροπορικές Αρχές και κατόπιν είναι απόφαση και ευθύνη των αρχών ο τρόπος διαχείρισης του εναερίου χώρου, και η επιβολή ή μη απαγόρευσης πτήσεων και τα τμήματα που θα αφορά.

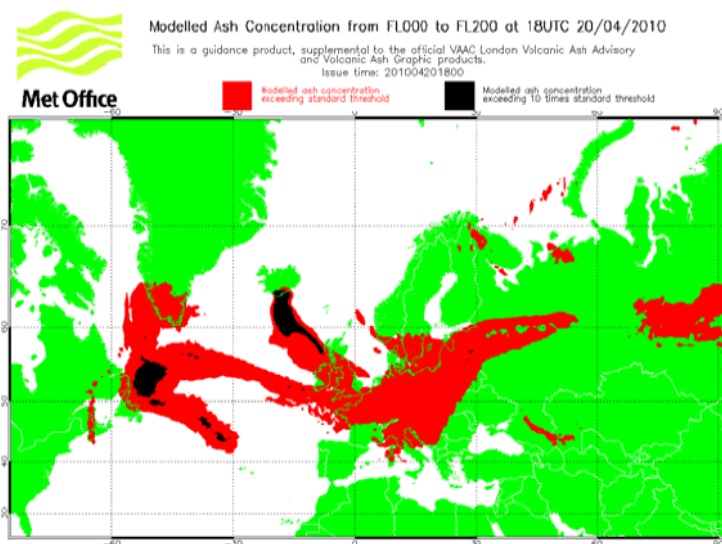
Το επιχειρησιακό μοντέλο που χρησιμοποιείται από το VAAC για να προσομοιωθεί η διασπορά του νέφους και να προβλεφθεί η κατεύθυνση του ονομάζεται NAME (Numerical Atmospheric-dispersion Modeling Environment) III και οι βασικές του αρχές έχουν εξηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα.

Από τη χρήση του NAME προέκυψαν γραφήματα που παρείχαν πληροφορίες και πρόβλεψη για την εξάπλωση του νέφους. Τα γραφήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν από τις Αεροπορικές Αρχές.



Εικόνα 52. Συμβουλευτικό γράφημα κίνησης της τέφρας σε διάστημα ενός 24ώρου (Mylne, 2010).

Επιπλέον παράγωγο του μοντέλου NAME είναι γραφήματα στα οποία παρουσιάζεται η συγκέντρωση τέφρας.



Εικόνα 53. Γράφημα όπου παρουσιάζεται η συγκέντρωση τέφρας εντός του νέφους την 20<sup>η</sup> Απριλίου 2010 (Mylne, 2010)

Οι κόκκινες ζώνες αντιπροσωπεύουν το πρότυπο όριο τέφρας ( $200\text{mg}$  τέφρας / $\text{m}^3$ ). Οι μαύρες ζώνες είναι περιοχές όπου η συγκέντρωση τέφρας είναι 20 φορές πάνω από το

όριο ( $4000 \text{ mg/m}^3$ ). Στις μαύρες ζώνες τα επίπεδα τέφρας είναι πολύ υψηλότερα από τις ανοχές των προδιαγραφών των μηχανών αεροσκαφών. (Mylne, 2010)

Στο σημείο σημειώνεται, ότι εκτός από το London Met Office και το VAAC παρακολούθηση του φαινομένου και καταγραφή των καιρικών συνθηκών και της εξάπλωσης του νέφους γινόταν και από την Ισλανδική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Icelandic Meteorological Office-IMO) σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Γεωεπιστημών του Πανεπιστημίου της Ισλανδίας (Institute of Earth Sciences at the University of Iceland-IES). Οι μελέτες τους διεξάγονταν με εργαλεία την επί τόπου παρακολούθηση, σειсмоγράφους, δορυφόρους, radar καθώς και με το ερευνητικό αεροσκάφος FALCON (Zehner, 2010).

Τέλος, πολλές ακόμα έρευνες και μελέτες τόσο του φαινομένου όσο και της κίνησης του νέφους έγιναν από πολλά πανεπιστήμια, ενδεικτικά αναφέρονται το πανεπιστήμιο Darmstadt της Γερμανίας, το Ινστιτούτο Μετεωρολογίας στο Clermont της Γαλλίας καθώς και το Institute of Air Research (NILU) της Νορβηγίας.

### 6.3.3 Αποτελέσματα προγνώσεων

Το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι αν θα μπορούσε να έχει προβλεφθεί έγκαιρα και έγκυρα η έκταση του φαινομένου και η διασπορά του νέφους τέφρας. Είναι γεγονός, πως η διασπορά πάνω από τη Βρετανία αλλά και την υπόλοιπη Ευρώπη ενός νέφους τέφρας, προερχόμενο από την Ισλανδία, δεν είναι φαινόμενο άνευ προηγουμένου. Τυρφώδη εδάφη που συναντώνται τόσο στη Σκωτία όσο και στην Βόρεια Αγγλία μαρτυρούν ισλανδικές εκρήξεις πριν από 4300, 2176, 1150 και 500 χρόνια ενώ στρώματα τέφρας ισλανδικής προέλευσης απαντώνται ακόμα σε Ιρλανδία, Γερμανία και άλλες χώρες της Ευρώπης (Barber, 2008).

Τα νέφη ηφαιστειακής τέφρας άρχισαν να θεωρούνται σημαντική απειλή τα τελευταία σαράντα χρόνια και σε αυτό συνετέλεσαν κυρίως δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η εισαγωγή μεγάλων αεροσκαφών με κινητήρες που λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες καθώς και η ταχεία σταθερή ανάπτυξη της εναέριας κυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται 5% ετησίως. Η ηφαιστειακή τέφρα και τα νέου τύπου αεροσκάφη, που κινούνται με ταχύτητες εδάφους μεγαλύτερες από  $800 \text{ km/h}$ , αποτελούν δύο παράγοντες, η αλληλεπίδραση των οποίων μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες.

Επιπλέον, η απειλή για τις αερομεταφορές από μια ενδεχόμενη έκρηξη ηφαιστείου στην Ισλανδία είχε ήδη υπογραμμισθεί στην τέταρτη συνάντηση του IAVWOPSG (International Airways Volcano Watch Operations Group) στο Παρίσι το 2008. Μάλιστα συμφωνήθηκε μεταξύ του Group και της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της Ισλανδίας (IMO) ότι ένα δεύτερο ραντάρ καιρού Doppler που θα τοποθετούνταν στην ανατολική Ισλανδία θα βοηθούσε στην καλύτερη παρακολούθηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Παρόλα ταύτα ενώ ένα δεύτερο ραντάρ θα ήταν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο επισημάνθηκε ότι να ληφθεί η τελική απόφαση θα χρειαζόταν μια λεπτομερής έκθεση αξιολόγησης της πρότασης και μια τέτοια αξιολόγηση ήταν πέραν των ορίων αρμοδιότητας του Group. (Peter Sammonds, 2010)

Οι προβλέψεις για το νέφος της τέφρας από το UK VAAC βασίζονται όπως έχει προαναφερθεί σε ένα μοντέλο Lagrange, το οποίο υπολογίζει τις τροχιές των σωματιδίων της τέφρας συναρτήσει των ανέμων που πνέουν στην περιοχή. Τα αποτελέσματα αυτού και παρόμοιων μοντέλων εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα δεδομένα που παρέχει το ίδιο το ηφαίστειο όπως είναι το ύψος του νέφους, ο ρυθμός απελευθέρωσης μάζας τέφρας από τον κρατήρα, η διάρκεια της έκρηξης, το υψόμετρο διασποράς της τέφρας και το μέγεθος των σωματιδίων. Αυτά τα δεδομένα πρέπει να είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια εξέλιξης. (Webley P. a., 2009)

Μάλιστα έχει συσταθεί ένας κώδικας ανίχνευσης ηφαιστειακής δραστηριότητας για χρήση της αεροπορίας, βάσει πρωτοκόλλων του ICAO. Ο κώδικας ωστόσο είναι σχεδιασμένος να παρέχει πληροφορίες για το περιβάλλον που βρίσκεται σε άμεση γειννίαση με την έκρηξη και όχι για τα νέφη τέφρας που έχουν απομακρυνθεί. Οι παρατηρήσεις γίνονται μέσω δορυφόρων και οι τέσσερις καταστάσεις που ορίζει ο κώδικας παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 8.** Χρωματικός κώδικας για την αεροπορία, όπως αποτυπώνεται από τα USGS παρατηρητήρια ηφαιστειακής δραστηριότητας

| Χρώμα            | Περιγραφή   |
|------------------|---|
| <b>Πράσινο</b>   | Το ηφαίστειο είναι στην συνήθη κατάστασή του, σε μη εκρηκτική φάση ή μετά από μια έκρηξη η ηφαιστειακή δραστηριότητα έχει περιοριστεί και έχει επιστρέψει στα προ έκρηξης επίπεδα.                    |
| <b>Κίτρινο</b>   | Το ηφαίστειο παρουσιάζει σημάδια κινητικότητας στο υπέδαφος ή μετά από μια έκρηξη έχει μειώσει σημαντικά την δραστηριότητά του αλλά συνεχίζεται η στενή παρακολούθηση για την πιθανότητα νέας έκρηξης |
| <b>Πορτοκαλί</b> | Το ηφαίστειο παρουσιάζει διαρκώς αυξανόμενη προ-εκρηκτική δραστηριότητα ή υπάρχει έκρηξη σε εξέλιξη με ελάχιστες ή καθόλου εκπομπές τέφρας (εάν είναι δυνατό διευκρινίζεται το ύψος του νέφους)       |
| <b>Κόκκινο</b>   | Το ηφαίστειο εκρήγνυται με σημαντικές εκπομπές τέφρας στην ατμόσφαιρα ή η έκρηξη επίκειται ωστόσο έχει ήδη ξεκινήσει η εκπομπή νέφους τέφρας στην ατμόσφαιρα  |

Πηγή: Ηφαιστειακό παρατηρητήριο της Αλάσκα (Alaska Volcanic Observatory 2010 [http://www.avo.alaska.edu/color\\_codes.php](http://www.avo.alaska.edu/color_codes.php))

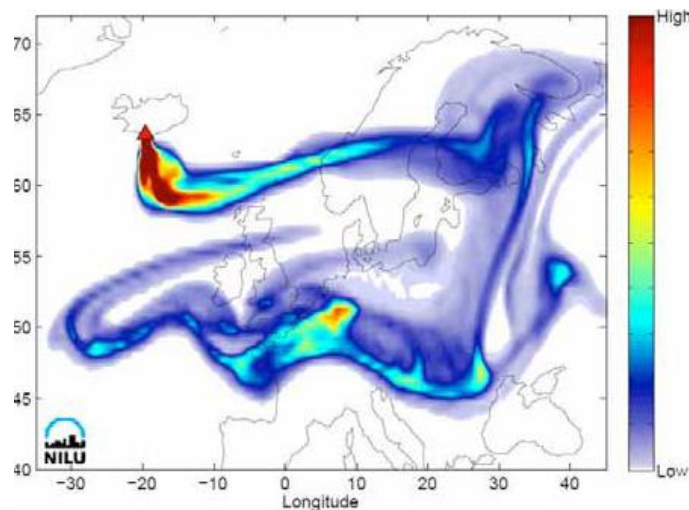
Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, πριν από την έκρηξη είχαν ήδη προηγηθεί τέσσερις εβδομάδες αναβρασμού στην περιοχή και αν είχε γίνει σωστή εκτίμηση της κατάστασης υπήρχε αρκετός χρόνος να γίνει η απαραίτητη πρόβλεψη και ο σχεδιασμός της αντιμετώπισης του φαινομένου. Επιπλέον, δεν υπάρχει η απαιτούμενη εμπειρία όσον αφορά πτήσεις εντός νέφους τέφρας, οπότε οι αεροπορικές αρχές στις χώρες που επλήγησαν από το νέφος προτίμησαν να ακολουθήσουν τον ασφαλέστερο κανόνα «καμία επαφή των αεροσκαφών με το νέφος». Η Μετεωρολογική Υπηρεσία του Λονδίνου ωστόσο, κατηγορήθηκε από πολλούς ότι διέκοψε για έξι μέρες τις πτήσεις με σκοπό να μην έρθουν σε επαφή τα αεροσκάφη με το νέφος, χωρίς να έχει εξετάσει την περιεκτικότητα του νέφους σε τέφρα και χωρίς να έχουν τεθεί και συμφωνηθεί τα επιτρεπτά όρια εντός των οποίων μπορούν να πραγματοποιούνται πτήσεις.

Ενώ λοιπόν η πιθανότητα μιας έκρηξης είχε τεθεί ως θέμα αρκετά πριν την έκρηξη του Eyjafjallajökull και ενώ η πρόγνωση για την Ισλανδία κάθε άλλο παρά απέκλειε την πιθανότητα έκρηξης στο άμεσο μέλλον, ο χειρισμός της κατάστασης καταδείκνυε σημαντικές αδυναμίες. Επιπλέον, την κατάσταση επιδείνωσε το γεγονός ότι τα υπάρχοντα πρωτόκολλα αεροναυτιλίας, τα οποία ίσχυαν την στιγμή της έκρηξης, ήταν ανελαστικά και δεν είχαν θεσπιστεί ασφαλή όρια επιπέδων τέφρας για τις πτήσεις.

#### 6.3.4 Μελέτες προ και μετά την έκρηξη του Eyjafjallajökull

Κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών της έκρηξης του ηφαιστείου, το βασικό πρόγραμμα προσομοίωσης βάσει του οποίου λαμβάνονταν οι αποφάσεις για την αεροναυτιλία ήταν το NAME του VAAC London. Μάλιστα, οι οδηγίες προς τον ICAO ήταν βασισμένες στην κατεύθυνση μηδενικής ανοχής νέφους, χωρίς την εξέταση της συγκέντρωσής του σε σωματίδια τέφρας. Πολλά ακόμα μοντέλα από αυτά που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκαν από άλλους VAACs καθώς και ερευνητικά τμήματα πανεπιστημίων και ινστιτούτων, τόσο για συλλογή και καταγραφή δεδομένων για στατιστικούς σκοπούς όσο και για την προσομοίωση του φαινομένου και την εξαγωγή προτάσεων για τον χειρισμό της κατάστασης.

Ακόμη ένα μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε την περίοδο της κρίσης από τον VAAC London ήταν το FLEXPART. Πρόκειται επίσης για ένα λαγκρανζιανό μοντέλο, το οποίο υπολογίζει τις τροχιές των σωματιδίων τέφρας χρησιμοποιώντας και μετεωρολογικά στοιχεία για τους ανέμους.



**Εικόνα 54.** Προσομοίωση στο FLEXPART την επόμενη της έκρηξης και το γράφημα δείχνει την πρόβλεψη για δύο μέρες μετά. Δεν διευκρινίζονται ακριβή επίπεδα συγκέντρωσης παρά μόνο ο χαρακτηρισμός με χρώμα και η αντιστοιχία με την μπάρα που δείχνει την κλίμακα. (Norwegian Institute for Air Research)

Παρά το πλήθος διαθέσιμων μοντέλων και των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από το σημείο της έκρηξης, αλλά και από τις πτήσεις, τα radar και τους δορυφόρους υπήρξαν πολλά κενά στην αποτελεσματική χρήση των συμπερασμάτων για να δοθεί λύση στο άμεσο πρόβλημα διακοπής των πτήσεων.

Επισημαίνεται ότι στο μέλλον απαιτείται καλύτερη πληροφόρηση αναφορικά με τις εξελίξεις στην πηγή του φαινομένου ώστε αυτό να μοντελοποιηθεί καλύτερα. Η χρήση δορυφορικών εικόνων μπορεί να βοηθήσει σημαντικά. Η μεταφορά νέφους από την Ισλανδία στην Νορβηγία αλλά και στην υπόλοιπη Ευρώπη ενδέχεται με τις ανάλογες καιρικές συνθήκες να μεταφερθεί εξαιρετικά γρήγορα. Στην περίπτωση του Eyjafjallajökull χρειάστηκαν μόνο 12 ώρες για να φθάσει η τέφρα στη Νορβηγία. Γι' αυτό και η απόκριση ενός βελτιωμένου συστήματος μοντελοποίησης πρέπει να είναι ταχεία (Jerzy Bartnicki, 2010).

Επιπλέον, οι ιδιαιτερότητες της συγκεκριμένης έκρηξης όπως η μεγάλη διάρκειά της, οι σχετικά ασυνήθιστες καιρικές συνθήκες και οι άνεμοι που έπνεαν στην περιοχή καθώς και η εναλλαγή δύο φάσεων έκρηξης από φρεατομαγματική σε μαγματική προσέθεταν επιπλέον δυσκολίες στην ανάλυση της και την προσομοίωση της κίνησης του νέφους. Τα σημεία που κατέδειξε η έκρηξη του Eyjafjallajökull ως κρίσιμα είναι τα εξής:

- Ως συνέπεια της φρεατομαγματικής εκρηκτικής φάσης δημιουργήθηκε ιδιαίτερα λεπτόκοκκη τέφρα που διασκορπίστηκε στην τροπόσφαιρα σε ύψος από 2 έως 10km. Επιπλέον η αλληλεπίδραση του μάγματος με τον πάγο δημιούργησε μικρά σωματίδια, τα οποία έκαναν την αρχική αναγνώριση του νέφους δυσκολότερη.
- Η συλλογή τηλεσκοπικών δεδομένων είναι μια χρήσιμη πηγή πληροφοριών.
- Η διαχείριση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και κοντά στην πηγή τυπικά περιέχει πληροφορίες για το ύψος του νέφους και την συγκέντρωσή του αλλά άρχισε να μελετάται μετά την έναρξη της συγκεκριμένης έκρηξης.
- Η αντοχή των αεροσκαφών στην τέφρα είναι ουσιώδους σημασίας και τα όρια που εκτάκτως αποφασίστηκαν στη διάρκεια αυτής της έκρηξης δεν έχουν διερευνηθεί διεξοδικά.
- Τα δεδομένα για τη συγκεκριμένη έκρηξη συγκεντρώνονταν από πολλές διαφορετικές τοποθεσίες γεγονός που καθιστούσε τη σύνθεσή τους δυσκολότερη.
- Η συνεργασία μεταξύ διαφορετικών ερευνητικών ομάδων και ειδικοτήτων παρόλο που δεν υπήρχε η απαιτούμενη οργάνωση εκ των προτέρων, θεωρείται ότι σε μεγάλο βαθμό απέδωσε. Η μετάδοση των γνώσεων που αποκομίστηκαν θα μπορούσε να βελτιωθεί.
- Μια από τις μεγαλύτερες αβεβαιότητες ήταν οι πληροφορίες στην πηγή της έκρηξης που έπρεπε να τοποθετηθούν ως παράμετροι αρχικοποίησης για την προσομοίωση με τη χρήση του μοντέλου. Η αυξημένη εξάρτηση των μοντέλων από τις αρχικές συνθήκες οδηγεί σε αποκλίσεις στις εξόδους.
- Η συγκέντρωση του νέφους τέφρας αποτελεί μια ακόμη πηγή αβεβαιότητας. Οι μετρήσεις αεροσκαφών δεν μπορούσαν να καλύψουν τις πυκνότερες περιοχές του νέφους καθώς υπάρχουν οι περιορισμοί του κινητήρα. Μελλοντικά ενδείκνυται η χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων αεροσκαφών σχεδιασμένα γι αυτό το σκοπό.
- Ο σαφής υπολογισμός της έκτασης του νέφους απαιτεί περισσότερα του ενός παρατηρητήρια. Χρειάζεται η σύνθεση συμπερασμάτων απ' όλα τα παρατηρητήρια για να εξαχθούν συμπεράσματα.

- Είναι ιδιαίτερα ουσιαστική και αναγκαία η ανταλλαγή πληροφοριών καθώς και ερευνητικών πρακτικών ανάμεσα στους εμπλεκόμενους επιστημονικούς φορείς.

Η μελλοντική έρευνα και οι ενέργειες βελτίωσης αναμένεται να επικεντρωθούν στα ακόλουθα:

- Ελεύθερη πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα μεταξύ των Ευρωπαϊκών Ινστιτούτων και βελτιστοποίηση τους.
- Συνδυασμός καλύτερων μεθόδων παρακολούθησης (δορυφόροι, ραντάρ, συστήματα εδάφους, πτήσεις), ώστε να ανιχνεύεται και να ταυτοποιείται έγκαιρα το νέφος τέφρας.
- Καλύτερη παρατήρηση των ηφαιστειών και των αλλαγών της κατάστασής τους.
- Βελτίωση του επιχειρησιακού σκέλους και βελτίωση της μοντελοποίησης διασποράς της τέφρας.
- Χρήση νέων δορυφόρων και όργανα αποκλειστικά για την παρακολούθηση των ηφαιστειών.
- Οι ενέργειες πρέπει πάντα να συντονίζονται με τον ICAO και με την Παγκόσμια Μετεωρολογική Υπηρεσία (WMO)
- Πρέπει μια φορά ετησίως να οργανώνεται συνάντηση μεταξύ των φορέων για να ελέγχεται η πρόοδος και να επικαιροποιούνται οι στόχοι. (Zehner, 2010)

#### 6.4 Επιπτώσεις στην Αεροναυτιλία της Ευρώπης

Η έκρηξη του Eyjafjallajökull προκάλεσε μια πρωτοφανή αναστάτωση κυρίως στον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο, όπου πολλά αεροδρόμια έκλεισαν, πτήσεις ακυρώθηκαν, επιβάτες ταλαιπωρήθηκαν. Κύρια αίτια για την κατάσταση αυτή ήταν:

- ⊕ Η έκταση του ηφαιστειακού νέφους και η υψηλή περιεκτικότητά του σε τέφρα, η οποία όπως έχει αναφερθεί σε προγενέστερο κεφάλαιο μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στα αεροσκάφη και στους κινητήρες τους με συνέπεια την απώλεια ανθρώπινων ζωών.
- ⊕ Οι καιρικές συνθήκες με ανέμους που ευνοούσαν την διασπορά του νέφους πάνω από την Ευρώπη και
- ⊕ Η ελλιπής προετοιμασία των διεθνών αεροπορικών οργανισμών για την αντιμετώπιση ενός γεγονότος αυτής της κλίμακας.

Το βασικό πρόβλημα ήταν ότι πριν από την έκρηξη, η αεροπορική βιομηχανία δεν είχε καθορίσει ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο τέφρας ώστε να μην διακόπτονται οι αερομεταφορές. Μέχρι τον Απρίλιο του 2010, και ενώ ήδη 30 χρόνια έχει εντοπιστεί το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα αεροσκάφη όταν πετούν σε νέφη τέφρας δεν είχε μπορέσει ακόμα να θεσπιστεί ένα ασφαλές όριο. Στην τέταρτη συνάντηση του IAVWOPSG (International Airways Volcano Watch Operations Group) στο Παρίσι το 2008 είχε εντοπιστεί η ανάγκη ορισμού ενός τέτοιου ορίου αλλά έως την έκρηξη του Eyjafjallajökull το 2010, δεν είχε γίνει καμία πρόοδος. Στις 20 Απριλίου και εξαιτίας των πιέσεων που προκαλούσε ο αποκλεισμός μέρους του ευρωπαϊκού εναέριου χώρου έγινε αυτό που απαιτούνταν όλο αυτό το διάστημα. Η Μετεωρολογική Υπηρεσία του



Ηνωμένου Βασιλείου (UK Met Office) με τη βοήθεια του προγράμματος μοντελοποίησης που διαθέτει (NAME) έθεσε ένα ασφαλές όριο στα επίπεδα τέφρας και σταδιακά άρχισε να επαναλειτουργεί ο εναέριος χώρος πάνω από την Ευρώπη, τουλάχιστον στα σημεία που βρίσκονταν κάτω από το όριο. Το κατώτατο όριο που τέθηκε είναι τα 200μg τέφρας/m<sup>3</sup> και το ανώτατο τα 2000 μg/m<sup>3</sup>. Τα συγκεκριμένα όρια καθορίστηκαν εσπευσμένα, υπό την πίεση των γεγονότων, από μια Μετεωρολογική Υπηρεσία, χωρίς επαρκή επιστημονική τεκμηρίωση και βάσει ενός προγράμματος μοντελοποίησης που δεν είναι σχεδιασμένο γι' αυτόν το σκοπό. Αξίζει να σημειωθεί παρά ταύτα ότι το ανώτατο όριο, το οποίο καθορίστηκε παραμένει 3 τάξεις μεγέθους χαμηλότερο από την τιμή που έχει επιβεβαιωθεί ότι μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην λειτουργία των κινητήρων και είναι τα 2g/m<sup>3</sup>. Αυτή η τιμή συγκέντρωσης ηφαιστειακής τέφρας αφορούσε στα δύο περιστατικά στα οποία κινδύνευσαν αεροσκάφη κατά τη διάρκεια της πτήσης, την δεκαετία του 80.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει την προοδευτική μείωση των περιορισμών κατά τη διάρκεια της έκρηξης:

**Πίνακας 9.** Προοδευτική αναδιαμόρφωση των κανόνων ασφάλειας πτήσεων στον εναέριο χώρο της Μεγάλης Βρετανίας

| Ημερομηνία | Ενέργεια  |
|------------|---|
| 20-Απρ     | Ορίστηκαν 3 ζώνες βάσει της συγκέντρωσης τέφρας στον εναέριο χώρο:<br>1. <200μg /m <sup>3</sup> : Κανένας Κίνδυνος<br>2. Ζώνη Ενισχυμένης Επίβλεψης: συγκέντρωση μεταξύ 200-2.000μg/m <sup>3</sup> (κόκκινη ζώνη)<br>3. Απαγορευμένη ζώνη: συγκέντρωση>2.000μg/m <sup>3</sup> (μαύρη ζώνη)  |
| 11-Μαϊ     | Ανάκληση της νεκρής ζώνης 60NM γύρω από περιοχές που η συγκέντρωση τέφρας θεωρείται μεγαλύτερη από 2.000μg/m <sup>3</sup>   |
| 17-Μαϊ     | Θέσπιση ζωνών περιορισμένου χρόνου (Γκρι ζώνες) με συγκέντρωση τέφρας μεταξύ 2.000-4.000μg/m <sup>3</sup> . Εκεί υπό συνθήκες θα μπορούσαν να πετούν αεροσκάφη για περιορισμένο χρόνο και υπό την προϋπόθεση ότι υπήρχε η διασφάλιση από τον κατασκευαστή ότι δεν παραβιάζονται τα όρια ανοχής ασφαλούς λειτουργίας του κινητήρα. |

Πηγή: (Peter Sammonds, 2010)

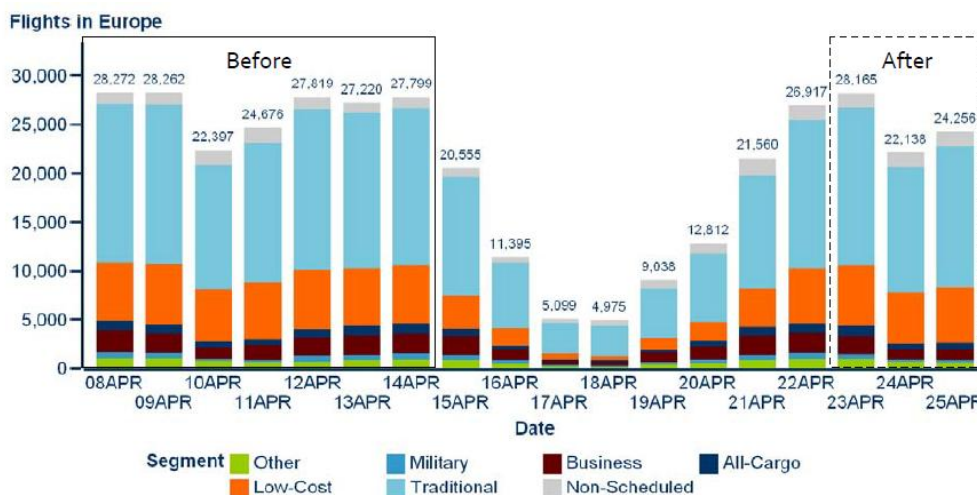
Η κατάσταση αυτή πέρα από τις ακυρώσεις στις οποίες οδήγησε λόγω του αποκλεισμού μέρους του ευρωπαϊκού εναέριου χώρου τις ημέρες της έκρηξης δεν επανήλθε πλήρως μέχρι τα τέλη Μαΐου, οπότε η συγκέντρωση τέφρας επέστρεψε σταδιακά στα φυσιολογικά επίπεδα. Ιδιαίτερο πρόβλημα προκάλεσαν οι καθυστερήσεις πτήσεων το Μάιο λόγω του περιφερόμενου πάνω από την Ευρώπη νέφους τέφρας.

#### 6.4.1 Καθυστερήσεις – ακυρώσεις

Η έκρηξη της 14<sup>ης</sup> Απριλίου οδήγησε στην αποδιοργάνωση περίπου 100 000 πτήσεων και επηρέασε 10 εκατομμύρια επιβάτες. Το οικονομικό πλήγμα ήταν τεράστιο, όχι μόνο για τις χώρες της Ευρώπης αλλά και για τον υπόλοιπο κόσμο. Η κύρια περίοδος της κρίσης ήταν από τις 15 έως τις 22 Απριλίου, όπου πολλά τμήματα του ευρωπαϊκού εναέριου χώρου έκλεισαν και ακυρώθηκαν 104000 πτήσεις. Βέβαια, το φαινόμενο επηρέασε πτήσεις τόσο πριν όσο και μετά τις ημερομηνίες αυτές. Πολλά αεροδρόμια

επηρεάστηκαν κατά τη διάρκεια του Μαΐου από το νέφος τέφρας, γεγονός που οδήγησε σε ακόμη 7000 ακυρώσεις.

Στο διάστημα της κρίσης πραγματοποιήθηκαν 5000 συμπληρωματικές πτήσεις – προγραμματισμένες ή/και ναυλωμένες – για να επανατοποθετηθούν αεροσκάφη και πληρώματα και να επαναπατριστούν ταλαιπωρημένοι επιβάτες.



**Εικόνα 55.** Αεροπορικές μεταφορές στην Ευρώπη πριν και κατά τη διάρκεια της κρίσης. (STATFOR\_Doc394, 2010)

Τα αεροδρόμια που επηρεάστηκαν περισσότερο είναι αυτά που βρίσκονταν κοντά στο επίκεντρο του φαινομένου και είναι τα: Ελσίνκι, Δουβλίνο, Μάντσεστερ και Εδιμβούργο που το 8ήμερο της κρίσης είχαν λιγότερες από το 25% των αναμενόμενων πτήσεων.

Παρά το γεγονός ότι μετά τις 22 Απριλίου φαίνεται ότι οι αερομεταφορές είχαν επιστρέψει σε φυσιολογικά επίπεδα κίνησης, η παρατήρηση αφορά συνολικά τις πτήσεις. Αντιθέτως, σε επιμέρους περιοχές, όπως οι Σκανδιναβικές χώρες συνέχιζαν να υπάρχουν σημαντικά προβλήματα.

Το Μάιο η επίδραση της τέφρας συνέχισε να προκαλεί προβλήματα στις προγραμματισμένες πτήσεις. Εκτός από την Ισλανδία επηρεάστηκαν επίσης η Ιρλανδία και η Σκωτία όπως και η ροή εναέριας κυκλοφορίας πάνω από τον Βόρειο Ατλαντικό. Όσον αφορά τις ακυρώσεις πτήσεων ήταν ιδιαίτερα αυξημένες την Κυριακή 9 Μαΐου όταν το νέφος έφθασε στις Άλπεις και τη 17<sup>η</sup> Μαΐου όταν επηρεάστηκαν τόσο η Νοτιοανατολική πλευρά της Μεγάλης Βρετανίας όσο και το Schiphol, το αεροδρόμιο του Amsterdam. Στην αποκατάσταση της εναέριας κυκλοφορίας βοήθησε και το γεγονός ότι μετά την 17<sup>η</sup> Μαΐου το ηφαίστειο παρήγαγε πλέον χαμηλότερους όγκους τέφρας και με διαρκώς μειούμενο ρυθμό. Επιπλέον, με την πάροδο των ημερών αυξάνονταν τα δεδομένα και η εμπειρία αναφορικά με την επίδραση του νέφους, με την κίνηση και τη συγκέντρωση του καθώς και με τις περιοχές που πρέπει να αποφευχθούν ώστε να εκτελούνται μεν οι πτήσεις χωρίς όμως να επηρεάζεται η ασφάλεια. Εξάγεται

έτσι το συμπέρασμα ότι ακόμη και εάν δεν είχε μειωθεί η παραγωγή τέφρας το Μάιο οι ακυρώσεις θα ήταν και πάλι λιγότερες σε σχέση με τον Απρίλιο.

Στη γενικότερη αναστάτωση, η αναφορά δεν πρέπει να περιορίζεται μόνον στις καθυστερήσεις και τις ακυρώσεις πτήσεων, αλλά και στον αναγκαστικό επαναπροσδιορισμό διαδρομής πτήσεων (rerouting), ώστε να αποφευχθεί μακρά παραμονή των αεροσκαφών εντός του νέφους.

#### 6.4.2 Οικονομικά στοιχεία

Κατά τη διάρκεια της κρίσης οι πτήσεις που επλήγησαν κυρίως ήταν οι χαμηλού κόστους. Την περίοδο 15-22 Απριλίου οπότε έγινε η 8ήμερη διακοπή ακυρώθηκε το 61% τέτοιων πτήσεων και το 48% των πτήσεων συνολικά. Πιθανό αίτιο είναι ότι οι πτήσεις αυτές έχουν χαμηλότερα ποσοστά ευελιξίας. Αντίθετα, οι εμπορικές πτήσεις είχαν λιγότερες απώλειες, με μια πώση της τάξης του 34%. Ακόμη και την 15<sup>η</sup> Απριλίου, όταν η μέση μείωση ήταν 28%, οι πτήσεις και οι αεροπορικές εταιρίες χαμηλού κόστους υπέστησαν μείωση 40%. Επιπλέον, σε αυτό τον τομέα, οι ακυρώσεις συνέχισαν ακόμα μετά τις 21 Απριλίου, όπου η μέση μείωση ήταν 23%, ενώ στον τομέα αυτό ήταν σημαντικά αυξημένη της τάξης του 35%. Υπάρχουν τρεις παράγοντες που φαίνεται να οδήγησαν σε αυτό:

1. Τα γεωγραφικά δρομολόγια αυτών των πτήσεων αναφορικά με το φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα, οι πτήσεις χαμηλού κόστους εντοπίζονται σε μεγάλο βαθμό στην Ιρλανδία και στη Μεγάλη Βρετανία, όπου οι ακυρώσεις και οι καθυστερήσεις ήταν ιδιαίτερα αυξημένες. Μάλιστα, στη Μεγάλη Βρετανία την 21<sup>η</sup> Απριλίου οι ακυρώσεις προγραμματισμένων πτήσεων έφθαναν το 50%, ενώ των πτήσεων χαμηλού κόστους το 44%, γεγονός που καταδεικνύει ότι η κύρια αιτία της μείωσης ήταν η εξάπλωση του νέφους στη συγκεκριμένη περιοχή.
2. Το γεγονός ότι αυτές είναι πτήσεις συνήθως μικρών αποστάσεων και είχαν πιο αργή επανάκαμψη σε σχέση με τις πτήσεις μεγάλων αποστάσεων, καθώς είναι δύσκολη η αναδρομολόγησή τους για την αποφυγή προβληματικών περιοχών.
3. Οι εμπορικές πτήσεις φαίνεται μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς επιχειρησιακό πρόβλημα σε καταστάσεις που προσεγγίζονται με τη λογική «όλα ή τίποτα» και να πραγματοποιηθούν υπό δύσκολες συνθήκες.

Σε αναφορά με τον τελευταίο παράγοντα, κάθε επιβατική πτήση χαμηλού κόστους εξυπηρετεί τις ανάγκες ενός μικρού αριθμού επιβατών. Οι δικές τους ανάγκες μπορούν να προσαρμοστούν ευκολότερα και να αλλάξουν βάσει τη διαθεσιμότητα του εναέριου χώρου. Ως συνέπεια των παραπάνω, οι εμπορικές πτήσεις είχαν τις λιγότερες μειώσεις κατά την 8ήμερη κρίση, μόλις 34%.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι οι πτήσεις charter ήταν και αυτές πολύ κοντά σε αυτό το ποσοστό με μείωση 36%. Και αυτές οι πτήσεις επανέκαμψαν μετά τις 21 Απριλίου. Πιθανόν βέβαια εδώ να έπαιξε ρόλο και ο αριθμός των συμπληρωματικών πτήσεων, πολλές από τις οποίες κάλυπταν κενά από την ακύρωση των προγραμματισμένων πτήσεων και χαρακτηρίζονταν ως charter. (STATFOR\_Doc394, 2010)

Η Διεθνής Ένωση Αεροπορικών Μεταφορών (International Air Transport Association-IATA) εκτιμά ότι η αεροπορική βιομηχανία παγκοσμίως είχε απώλειες περίπου 148Μ € την ημέρα σε αυτό το δήμερο διάστημα, συνολικά στη διάρκεια της κρίσης περίπου 2.5bn €. Επιπλέον, υπήρξαν παράπλευρες οικονομικές απώλειες αφού συνέπεια της διακοπής των πτήσεων ήταν να πληγούν οι οικονομίες χωρών των οποίων οι εξαγωγές, οι εισαγωγές, ο τουρισμός επηρεάστηκαν από το φαινόμενο. (Zehner, 2010) . Στην Κέννα καταστράφηκαν 400tn λουλουδιών, διότι ήταν αδύνατον να μεταφερθούν στην Μεγάλη Βρετανία στις 19-20 Απριλίου. Αυτό οδήγησε την τοπική οικονομία σε απώλειες \$3.8M την ημέρα, για τις ημέρες της διακοπής. Συνολικά καταστράφηκαν 3000tn λουλουδιών. (BBC\_news, Iceland volcano cloud: The economic impact, 2010). Παρόμοια η κατάσταση και στην οικονομία της Ζάμπια που για τους ίδιους λόγους οδηγήθηκε σε απώλειες \$150K ημερησίως. Επιπλέον, επηρεάστηκε και η εξαγωγή ψαριών και λουλουδιών από την Ουγκάντα. Αυτά οδήγησαν στην προσωρινή απόλυση εκατοντάδων εργατών στις περιοχές αυτές (BBC\_news, Volcanic flight ban hits Kenya farm workers, 2010). Η εξαγωγή λουλουδιών διεκόπη και για την Ολλανδία σε μια κρίσιμη περίοδο καθώς οι αρχές του Μαΐου είναι η εποχή που εξάγει ορχιδέες στην Β.Αμερική καθώς ξεκινά η περίοδος αύξησης των γαμήλιων τελετών.

Ιδιαίτερο πλήγμα δέχθηκε και ο τουρισμός στις χώρες και είχε καταλυτικό ρόλο στη συνολική οικονομική ζημία που καταγράφηκε. Χαρακτηριστικό είναι ότι στη Μεγάλη Βρετανία το καλοκαίρι του 2010 έκλεισαν 13 εταιρείες ταξιδιών γεγονός στο οποίο συνετέλεσε και η κρίση του Απριλίου – Μαΐου 2010. (BBC\_news, Kiss Flights travel company ceases trading, 2010)

Στους τομείς που επλήγησαν ανήκει ακόμα και η αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς ορισμένες εταιρείες (BMW, Nissan) αναγκάστηκαν να διακόψουν την παραγωγική διαδικασία λόγω ελλείψεως εξαρτημάτων. (BBC\_News, 2010)

Επιπλέον, ο ετήσιος τζίρος της αεροπορικής βιομηχανίας μειώθηκε κατά 25%. Αντίθετα, με τα μέτρα ασφαλείας, εξοικονομήθηκαν περίπου \$ 110M δολάρια την ημέρα στο διάστημα της διακοπής από τα καύσιμα των αεροσκαφών που καθηλώθηκαν. (IATA, 2010)

## 6.5 Ηφαιστεια που απειλούν την αεροναυτιλία στην Ευρώπη

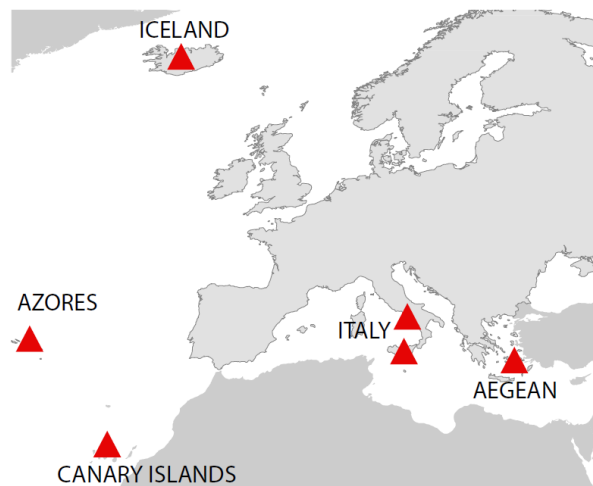
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ηφαιστειότητα συνδέεται κατεξοχήν με διαδικασίες στα όρια των λιθосφαιρικών πλακών, έτσι διακρίνουμε παγκοσμίως τρεις μεγάλες γραμμές ενεργών ηφαιστειών:

- Τις γραμμές των μεσοωκεάνιων ράχων. Οι μεσοωκεάνιες ράχες εγκαθίστανται πάνω σε αποκλίνοντα όρια λιθосφαιρικών πλακών και τα ηφαιστεια στις γραμμές αυτές είναι συνήθως υποθαλάσσια με εξαιρέσεις ορισμένες περιπτώσεις όπου φθάνουν σε ύψη τέτοια ώστε τα κορυφαία τμήματά τους αναδύονται πάνω από τη θάλασσα (Ισλανδία, Bouvet, Νησιά του Πάσχα)
- Την περι-ειρηνική γραμμή, η οποία αποτελείται από ηφαιστεια που συνδέονται με συγκλίνοντα όρια λιθосφαιρικών πλακών (υποβύθιση της πλάκας του Ειρηνικού

κάτω από τις πλάκες που την περιβάλλουν Β. και Ν.Αμερικής, ευρασιατικής, αυστραλοϊνδικής). Ηφαίστεια συναντάμε κατά μήκος του πύρινου αυτού τόξου, όπως στα Αλεούτια Νησιά, Ιαπωνία, Φιλιππίνες μέχρι τη Νέα Ζηλανδία.

- ☛ Η Μεσογειακή-μεσοασιατική γραμμή που επίσης συνδέεται με συγκλίνοντα όρια πλακών και πιο συγκεκριμένα με την υποβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από την ευρασιατική. Εδώ περιλαμβάνονται τα ηφαίστεια της Νότιας Ιταλίας (Βεζούβιος, Αίτνα, Στρομπόλι), τα ελληνικά ηφαίστεια (Μέθανα, Μήλος Σαντορίνη, Νίσυρος) και τα ηφαίστεια της ζώνης Καυκάσου/Αρμενίας-Ιμαλαΐων (Παπανικολάου & Σίδερης, 2008)

Από τις παραπάνω ζώνες οι πιο απειλητικές για την Ευρώπη είναι η γραμμή της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού, καθώς και η Μεσογειακή-μεσοασιατική γραμμή.



**Εικόνα 56.** Τοποθεσίες ηφαιστειών που απειλούν την ευρωπαϊκή αεροναυτιλία (Peter Sammonds, 2010)

Η Ισλανδία, που ανήκει στη γραμμή της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού, μπορεί ανά πάσα στιγμή να εμφανίσει δραστηριότητα σε ένα από τα πολλά ηφαίστεια που διαθέτει. Ένα από τα πιο ισχυρά ηφαίστεια της Ισλανδίας είναι η Κάτλα. Η Κάτλα είναι πέντε φορές μεγαλύτερη και εκατό φορές ισχυρότερη από το Eyjafjallajökull. Έχει ύψος 1500m και καλύπτεται επίσης από παγετώνα 600km<sup>2</sup>. Η καλδέρα της έχει διάμετρο 10km και βάθος 700m και είναι καλυμμένη με πάγο. Ιστορικά επισημαίνεται ότι τις φορές που εξερράγη το Eyjafjallajökull, εξερράγη και η Κάτλα μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη οδηγούμαστε σε τήξη των πάγων και αυτό το φαινόμενο έχει ως συνέπεια την κίνηση μάγματος στο υπέδαφος (Pinel, Sigmundsson, & Sturkell, 2007).

Η Κάτλα πέρα από τις εκρήξεις που ακολούθησαν τη δραστηριότητα του Eyjafjallajökull, έχει δώσει και από μόνη της ιδιαίτερα ισχυρές εκρήξεις (1625, 1755, 1918). Η Κάτλα φαίνεται να εναλλάσσει δύο καταστάσεις, μια κατά την οποία εκρήγνυται κάθε 20–70 χρόνια και μια κατά την οποία εκρήγνυται κάθε 200 χρόνια. Η ανάλυση της σεισμικής δραστηριότητας γύρω από την Κάτλα κατά την τελευταία δεκαετία ερμηνεύεται ως παροχή αποδεικτικών στοιχείων ότι υπάρχει μια παρεμβατική δομή μάγματος στη δυτική πλευρά του ηφαιστείου (Peter Sammonds, 2010). Πάντως, η

Κάτλα φαίνεται να έχει τη συνήθη σεισμική δραστηριότητα και να μην έχει επηρεαστεί προς το παρόν από το Eyjafjallajökull. Επισημαίνεται ότι η Κάτλα έχει τόση λάβα που θα μπορούσε να υπερπληρώσει την ατμόσφαιρα με τέφρα πυριτίου. Σε περίπτωση παρατεταμένης έκρηξης, αναμένεται – εκτός από την απαγόρευση των πτήσεων – ένα φαινόμενο που ονομάζεται «ηφαιστειακός χειμώνας», κατά το οποίο το νέφος της τέφρας εμποδίζει την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στη Γη.

Εκτός από την Κάτλα, υπάρχουν πολλά ακόμη ηφαίστεια στην Ισλανδία τα οποία είναι πιθανό να δώσουν εκρήξεις. Επειδή τα ηφαίστεια της Ισλανδίας καλύπτονται από παγετώνες, είναι ιδιαίτερα πιθανό να σχηματιστεί εκ νέου τέφρα, η οποία υπό συνθήκες μπορεί να δημιουργήσει νέφη πάνω από την Ευρώπη.

Ένα ακόμα επικίνδυνο ηφαίστειο είναι η Αίτνα που βρίσκεται στην Σικελία. Πρόκειται για το μεγαλύτερο και υψηλότερο ενεργό ηφαίστειο στην Ευρώπη. Έχει ύψος 3350m, καλύπτει έκταση 1190km<sup>2</sup> και έχει περιφέρεια βάσης 140km, είναι μάλιστα τρεις φορές μεγαλύτερη από τον Βεζούβιο. Η Αίτνα έχει δώσει ιδιαίτερα ισχυρές εκρήξεις στην αρχαιότητα (στο διάστημα πριν 35000 – 20000 χρόνια έγινε σειρά ισχυρών εκρήξεων, πριν 3500 χρόνια μια ηφαιστειακή έκρηξη προκάλεσε γιγαντιαία κατολίσθηση και τέλος πριν 2000 χρόνια ακολούθησε νέα κατολίσθηση δημιουργώντας καλντέρα). Αλλά και στη σύγχρονη εποχή η Αίτνα θεωρείται ένα ηφαίστειο συνεχούς δραστηριότητας, με πιο καταστροφική την έκρηξη του Μαρτίου 1669 που κατέστρεψε τουλάχιστον 10 χωριά πριν φθάσει στην πόλη της Κατάνια και κόστισε τη ζωή σε 20000 ανθρώπους. Έκτοτε, έχει εκραγεί τουλάχιστον άλλες 60 φορές με πολύ μικρότερες συνέπειες. Ήδη, τα τελευταία 15 χρόνια έχει εκραγεί το 2000, 2002-3, 2004-5, 2011 και τον Ιανουάριο του 2012. Η έκρηξη του Ιουλίου 2011 δημιούργησε νέφος τέφρας, το οποίο τελικά δεν δημιούργησε προβλήματα στο αεροδρόμιο της Κατάνια και γενικότερα στην αεροναυτιλία αφού παρασύρθηκε από τους ανέμους πάνω από το Ιόνιο πέλαγος.

Τα ηφαίστεια της Μεσογείου είναι στη γραμμή σύγκλισης λιθοσφαιρικών πλακών και γι αυτό το λόγο δίνουν πιο βίαιες εκρήξεις. Στη Σαντορίνη η ηφαιστειακή έκρηξη του 17<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ. οδήγησε στο σχηματισμό της καλδέρας. Η πιο πρόσφατη έκρηξη έγινε το 1950.

Εκτός από τα ηφαίστεια της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού και τα ηφαίστεια της Μεσογειακή-μεσοασιατικής γραμμής, τα ηφαίστεια της περι-ειρηνικής γραμμής είναι ιδιαίτερα ισχυρά και αν και απέχουν περισσότερο από την Ευρώπη ενδέχεται να δώσουν τόσο ισχυρή έκρηξη που να επηρεάσει όλο τον κόσμο. Άλλωστε, οι Φιλιππίνες διαθέτουν ηφαίστεια που στην κλίμακα ηφαιστειακής εκρηκτικότητας βαθμολογούνται με 6 με ανώτατο όριο το 8.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η αεροναυτιλία ενδέχεται να επηρεαστεί εκ νέου από μελλοντικές ηφαιστειακές εκρήξεις, τόσο στην Ισλανδία όσο και στον υπόλοιπο κόσμο. Γι' αυτό απαιτείται η καλύτερη δυνατή προετοιμασία ώστε να περιοριστούν οι συνέπειες. Το γεγονός, ότι η έκρηξη του Eyjafjallajökull οδήγησε στη θέσπιση ασφαλών ορίων τέφρας εντός των οποίων μπορούν να εκτελούνται πτήσεις είναι μια

θετική εξέλιξη. Ωστόσο, τα όρια αυτά θεσπίστηκαν εμπειρικά και υπό την πίεση των καταστάσεων και ίσως θα πρέπει να τεκμηριωθούν επιστημονικά καθώς και να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως ο τύπος και η ηλικία του κινητήρα, το δρομολόγιο, η υποστήριξη που υπάρχει από το έδαφος, οι ικανότητες του πιλότου και άλλα. Μια αναθεώρηση των ορίων ή μια διατήρηση των υαρχόντων αλλά με επαρκή επιστημονική τεκμηρίωση κρίνεται απολύτως αναγκαία.

## 7 Συμπεράσματα

Η μελέτη των ηφαιστειακών εκρήξεων και των επιπτώσεών τους στην αεροναυτιλία και τα αεροδρόμια, μια θεώρηση τόσο μέσα από την ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα όσο και από τις αποφάσεις και διαδικασίες των φορέων της αεροναυτιλίας σε επιχειρησιακό επίπεδο, οδηγεί σε συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται συνοπτικά στην παρούσα ενότητα.

- ⊕ Ο νευραλγικός για την ασφάλεια και την οικονομία τομέας των αερομεταφορών (αεροναυτιλία και αεροδρόμια) διατρέχει κινδύνους σε καταστάσεις ηφαιστειακής κρίσης και επομένως η έρευνα για την αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων της ηφαιστειακής έκρηξης πρέπει να ενταθεί από πλευράς πολιτικής αεροπορίας.
- ⊕ Η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου σε παγκόσμιο επίπεδο καθιστά ιδιαίτερος πιθανή την εκδήλωση σοβαρών γεγονότων ανά 2 ή 3 έτη και επομένως απαιτείται μόνιμη παρακολούθηση, βελτίωση και πάγιες διαδικασίες αντιμετώπισης της κρίσης.
- ⊕ Το οικονομικό κόστος των επιπτώσεων σε συνδυασμό με τη συχνότητα που προαναφέρθηκε καθιστούν οικονομικά συμφέρουσα και επομένως προτιμότερη την επένδυση επί συστημάτων μέτρησης και πρόβλεψης αλλά και διαδικασιών που θα επιτρέπουν τη διαχείριση των επιπτώσεων της ηφαιστειακής κρίσης με ασφαλή μεν αλλά και αποδοτικό ταυτόχρονα τρόπο.
- ⊕ Η απόθεση ηφαιστειακής τέφρας σε αεροδρόμια κοντά στην πηγή της ηφαιστειακής έκρηξης δημιουργεί πληθώρα προβλημάτων στη λειτουργία του αεροδρομίου, στη λειτουργία των συστημάτων εδάφους, στην ασφάλεια των σταθμευμένων αλλά και των προς προσγείωση και απογείωση αεροσκαφών και υπό συνθήκες στην υγεία του προσωπικού που εργάζεται στο αεροδρόμιο αλλά και των επιβατών. Η λήψη κατάλληλων προληπτικών μέτρων προστασίας μπορεί να μετριάσει τις επιπτώσεις της απόθεσης της ηφαιστειακής τέφρας και να διατηρήσει τη λειτουργία του αεροδρομίου έστω και σε μειωμένους ρυθμούς.
- ⊕ Τα άμεσα αποτελέσματα από την έκθεση αεροσκάφους εν πτήση σε νέφος ηφαιστειακής τέφρας ποικίλουν ανάλογα με το είδος του αεροσκάφους, τον τρόπο λειτουργίας του κινητήρα του, την αεροδυναμική του, το χρόνο έκθεσής τους στην τέφρα και το είδος και την συγκέντρωση του νέφους της τέφρας. Το εύρος των συμβάντων που έχουν προκύψει από έκθεση αεροσκαφών σε ηφαιστειακή τέφρα εκτείνεται από αναφορές για οσμή εντός της καμπίνας, μέχρι και σε παύση λειτουργίας κινητήρα, ενώ ποτέ δεν έχει γίνει ατύχημα λόγω της συγκεκριμένης αιτίας.
- ⊕ Η κρίση του ηφαιστείου Eyjafjallajökull προκάλεσε ζημιά κόστους 2.5bn € για τις αεροπορικές εταιρίες, ενώ το συνολικό κόστος από έμμεσες ζημιές έπληξε μέσω του εμπορίου και χώρες της Αφρικής και της Ασίας. Η έλλειψη ετοιμότητας στην αποτελεσματική διαχείριση της ηφαιστειακής έκρηξης από την αεροναυτιλία είχε σοβαρό αντίκτυπο, δυσανάλογα μεγάλο της έκτασης του ηφαιστειακού νέφους και ήταν κυρίως αποτέλεσμα της ελλιπούς ετοιμότητας των αρμοδίων φορέων.



- ⊕ Η αδυναμία καθορισμού όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στον καθορισμό του επιπέδου του κινδύνου που προκαλεί η διέλευση από νέφος ηφαιστειακής τέφρας οδήγησε στο παρελθόν τον ICAO στην υιοθέτηση στρατηγικής μηδενικής ανοχής. Κατά τη διάρκεια της πρόσφατης ηφαιστειακής κρίσης του Eyjafjallajökull αναδείχθηκε η ανάγκη επαναπροσδιορισμού της στρατηγικής και επανακαθορισμού ορίων ασφαλείας για τη συγκέντρωση ηφαιστειακής τέφρας με ρεαλιστικό τρόπο.
- ⊕ Ο καθορισμός των νέων ασφαλείας ορίων προέκυψε κατά τη διάρκεια της κρίσης και ως αποτέλεσμα αυτής με άμεσο επακόλουθο τα εν λόγω όρια να έχουν εντελώς εμπειρικό χαρακτήρα και ελάχιστη επιστημονική τεκμηρίωση. Στο προσεχές μέλλον θα ήταν σκόπιμη η ενδεδειγμένη μελέτη του θέματος με σκοπό τον καθορισμό επιπέδων ασφαλείας ηφαιστειακής τέφρας για την αεροναυτιλία. Στοιχεία, όπως το ότι κανένα συμβάν δεν έχει αναφερθεί από έκθεση σε ηφαιστειακή σκόνη, παρά μόνο σε στάχτη, μπορούν να αποτελέσουν βάση για περαιτέρω έρευνα. Τόσο η μελέτη και το γράφημα «safe to fly» της Rolls-Royce, όσο και μελέτες που αφορούν αεροπλάνα που έχουν εκτεθεί σε ηφαιστειακή τέφρα συντείνουν ότι και το νέο όριο των  $2\text{mg}/\text{m}^3$  είναι εξαιρετικά αυστηρό, αφού και για διέλευση από νέφη με διπλάσια συγκέντρωση σωματιδίων τέφρας  $4\text{mg}/\text{m}^3$  δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα στη λειτουργία των κινητήρων. Το αποτέλεσμα από την αύξηση των ορίων θα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμο στη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας σε καταστάσεις κρίσης και πρέπει να διαμορφωθεί στο μέγιστο ασφαλές επίπεδο.
- ⊕ Ο στόχος της διαχείρισης των ηφαιστειακών κρίσεων, από τα VAAC που έχουν ορισθεί αρμόδια για το σκοπό αυτό από τον ICAO, ήταν έως πρότινος η έγκαιρη συνέγερση για έκλυση ηφαιστειακής τέφρας στην ατμόσφαιρα, με σκοπό την απαγόρευση των πτήσεων σε τμήματα του εναερίου χώρου που υπάρχει ή πρόκειται να υπάρξει τέφρα. Πλέον ο στόχος έχει τροποποιηθεί και κυρίως έχει αλλάξει χαρακτήρα. Η επιχειρησιακή απαίτηση πλέον δεν περιορίζεται στην αναγνώριση του κινδύνου από την ηφαιστειακή τέφρα, αλλά απαιτείται σαφής καθορισμός των ποσοτικών στοιχείων που συμπληρώνουν την πληροφορία της ύπαρξης με πληροφορίες σχετικά με το εύρος και το είδος του ηφαιστειακού νέφους, της πυκνότητας και της συγκέντρωσής του σε σωματίδια και των κατανομών των παραπάνω στοιχείων χωρικά και χρονικά σε χάρτες αποτύπωσης και πρόβλεψης της εξέλιξης του φαινομένου.
- ⊕ Προκειμένου να δοθούν πληροφορίες και προβλέψεις με αξιοπιστία και ακρίβεια απαιτείται έρευνα και ανάπτυξη σε σχέση καταρχάς με τα μοντέλα μεταφοράς και εναπόθεσης ηφαιστειακής τέφρας VATDM, ώστε να λειτουργούν συνεργατικά με την ελάχιστη δυνατή ευαισθησία στις εισόδους τους. Ταυτόχρονα πρέπει να εμπλουτιστούν τα μοντέλα NWP προς την ίδια κατεύθυνση, ώστε να παρέχουν ακριβέστερη μετεωρολογική πληροφορία και πρόγνωση, και ως εκ τούτου να τροφοδοτούν με βέλτιστες εισόδους τα μοντέλα VATDM.
- ⊕ Η ανάπτυξη των μοντέλων VATDM μπορεί να έρθει μέσα από νέες στρατηγικές για την πρόβλεψη της ηφαιστειακής τέφρας, μέσα από τη συνεργασία επί τεχνικών και μεθοδολογιών πρόβλεψης και διαφορετικών μέσων παρατήρησης, αλλά κυρίως μέσα από τη συνεργασία των αρμόδιων φορέων όπως της μετεωρολογίας, των ερευνητικών ινστιτούτων, των φορέων παροχής υπηρεσιών αεροναυτιλίας, των

VAACs, των ειδικών από το χώρο της αεροναυπηγικής και κυρίως των κατασκευαστών αεροσκαφών.

- ⊕ Στον τομέα της ανάπτυξης των μοντέλων ως σημαντικότερες βελτιώσεις προτάθηκαν η βαθμονόμηση των μοντέλων με πειραματικά δεδομένα, η λειτουργία των μοντέλων συνεργατικά και ενδεχομένως μέσα από την λειτουργία ενός νευρωνικού δικτύου που θα αποφάσιζε το βέλτιστο συνδυασμό μοντέλων πρόβλεψης για τον καθορισμό του τελικού αποτελέσματος, την προτυποποίηση των εισόδων και εξόδων, την ελαχιστοποίηση της ασάφειας και της ευαισθησίας σε μεταβολές προγνωστικών εισόδου.
- ⊕ Η υπολογιστική ικανότητα των συστημάτων αξιολόγησης των δεδομένων πραγματικού χρόνου και η ταχύτητα μετάδοσής τους με τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, καθορίζουν ως αποκλειστικό παράγοντα βελτίωσης την αύξηση των λαμβανομένων μετρήσεων και τη λήψη αντιπροσωπευτικών τιμών από όλα τα σημεία του χώρου. Δορυφορικά συστήματα, συστήματα LiDAR επί αεροσκαφών που δημιουργούν ad hoc δίκτυο μετρήσεων και λοιπές λύσεις θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ποιότητα και την ποσότητα των λαμβανομένων μετρήσεων, με απώτερο κέρδος την καλύτερη πρόβλεψη των μοντέλων VATDM.
- ⊕ Η βέλτιστη λύση στον τομέα της συλλογής δεδομένων πραγματικού χρόνου θα ήταν η χρήση UAVs σε καταστάσεις κρίσης συμπληρωματικά των ήδη υπαρχόντων πηγών μετρήσεων. Τα τυπικά UAVs με 18ώρες πτητικής αυτονομίας, κάλυψη περιοχής 350km και με δυνατότητα μεταφοράς αισθητήρων της τάξης των 100kg μπορούν να αποτελέσουν οικονομική και αξιόπιστη πηγή μετρήσεων πραγματικού χρόνου in situ, χωρίς να υπάρχει ζήτημα ασφάλειας, δεδομένου ότι είναι ανεπάνδρωτα.
- ⊕ Ενοποιημένη διαδικαστική αντιμετώπιση των ηφαιστειακών κρίσεων από τις υπηρεσίες αεροναυτιλίας παγκοσμίως και κυρίως βελτίωση των διαδικασιών πλοήγησης των αεροσκαφών με σύγχρονα συστήματα εντοπισμού θέσης για ασφαλέστερη και ακριβέστερη πλοήγηση θα μπορούσε να βελτιώσει αισθητά τη χωρητικότητα του εναερίου χώρου σε μόνιμη βάση αλλά και σε καταστάσεις κρίσης.

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα στους βασικούς άξονες ενεργειών που θα οδηγούσαν στη άμβλυνση των επιπτώσεων στην αεροναυτιλία από τη μεταφορά και εναπόθεση ηφαιστειακής τέφρας προτείνεται η εξής στρατηγική ανάπτυξης και βελτίωσης. Η βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης της μεταφοράς ηφαιστειακής τέφρας, τα οποία σε συνδυασμό με επιστημονικό καθορισμό των νέων ορίων ασφαλείας και με αξιόπιστο δίκτυο μετρήσεων πραγματικού χρόνου, θα συνέθεταν χάρτες απαγορευμένων περιοχών μεγάλης ακριβείας, ώστε τα αεροσκάφη ακολουθώντας διαδικασίες ακριβείας να πλοηγούνται στα όρια ασφαλείας απρόσκοπτα και να εκμεταλλεύονται τον ασφαλή εναέριο χώρο στο μέγιστο βαθμό.

## 8 Βιβλιογραφία

- Barber, K. L. (2008). Dating the Glen Garry tephra: a widespread late-Holocene marker horizon in the peatlands of northern Britain. *The Holocene*, 31-43.
- BBC\_news. (2010, April 20). *Iceland volcano cloud: The economic impact*. Ανάκτηση June 2012, από <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/8629623.stm>
- BBC\_news. (2010, August 18). *Kiss Flights travel company ceases trading*. Ανάκτηση June 2012, από <http://www.bbc.co.uk/news/business-10449594>
- BBC\_News. (2010, April 21). *Recriminations grow over airline costs*. Ανάκτηση June 2012, από BBC News: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/8633451.stm>
- BBC\_news. (2010, April 20). *Volcanic flight ban hits Kenya farm workers*. Ανάκτηση June 2012, από BBC News: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/8629079.stm>
- Benton, M. (2005). *When Life Nearly Died: The Greatest Mass Extinction of All Time*. New York: Thames & Hudson.
- Berbente, C. (2011). *Studies on the Measurement and the Effects of the Volcanic Origin Particles in Suspension in the Atmosphere on the Safety of Aircraft*. Bucharest: University Politehnica of Bucharest (UPB), Research Centre for Aeronautics and Space (CCAS) 313 Splaiul Independentei, 060042 Bucharest, Romania.
- Berbente, C. (2011). *Volcanic Ash Safety in Air Traffic Management, A White Paper*. European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL).
- Bonadonna, C., Folch, A., Loughlin, S., & Puempel, H. (2011). *Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation Workshop - Consensual Document*. Geneva.
- Camp, D. V. (2006). *HOW VOLCANOES WORK*. Ανάκτηση January 7, 2012, από [http://www.geology.sdsu.edu/how\\_volcanoes\\_work/index.html](http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/index.html)
- Casadewall, T. J. (1993). *Volcanic ash and airports — Discussions and recommendations from workshop on the impact of volcanic ash on airport facilities*. Washington: US Geological Survey.
- Case Study: Eyjafjallajokull, Iceland 2010*. (n.d.). Ανάκτηση από GeogWeb Resources: [www.geogweb.com](http://www.geogweb.com)
- D'Amours, R. A.-P.-B. (2010). Application of the atmospheric Lagrangian particle dispersion model MLDP0 to the 2008 eruptions of Okmok and Kasatochi volcanoes. *J.Geophys. Res.*
- Davis, U. o. (2008). *Volcanic Eruption Of 1600 Caused Global Disruption*. Ανάκτηση January 7, 2012, από <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080423135236.htm>
- Draxler RR, H. G. (1998). An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine* 47, 295–308.
- EASA. (2002). <http://easa.europa.eu>.

easyJet. (2012). <http://blog.easyjet.com/easyjet-and-nicarnica-aviation-successfully-trial-avoid-ash-detection-technology/>.

Elbern, H. A. (2007). Emission rate and chemical state estimation by 4-dimensional variational inversion. *Atmos. Chem. Phys* , 3749-3769.

Eurocontrol. (1963). <http://www.eurocontrol.int/>.

*Eyjafjallajokull case study*. (n.d.). Ανάκτηση June 2012, από <http://geogteacher.files.wordpress.com/2011/12/gcse-eyjafjallajokull1.ppt>

F.J. Gathorne-Hardy, W. H.-S. (2003). The super-eruption of Toba, did it cause a human bottleneck? *Journal of Human Evolution* , 45, 227-230.

FAA. (1958). <http://www.faa.gov/>.

Folch, A. A. (2009). A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Computers and Geosciences* 35 , 1334-1342.

Guffanti, M., Casadevall, T. J., & Budding, K. (2010). *Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: A Compilation of known incidents, 1953–2009*. Virginia: U.S. Geological Survey.

Guffanti, M., Mayberry, G., Casadevall, T., & Wunderman, R. (2007). *Compilation of Disruptions to Airports by Volcanic Activity*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Guffanti, M., Mayberry, G., Casadevall, T., & Wunderman, R. (2008). Volcanic hazards to airports. *Nat Hazards* .

Heiken, G. (1991). Volcanic Ash: What It Is and How It Forms. *First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, (σ. p.42). U.S. Geological Survey Bulletin.

Hoblitt, M. S. (1987). *Volcanic Hazards with Regard to Siting Nuclear-Power Plants in the Pacific Northwest*. USGS Open-File Report.

IATA. (2010). *IATA Economics Briefing: The Impact of Eyjafjallajokull's Volcanic Ash Plume*. Ανάκτηση June 2012, από IATA: <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/Volcanic-Ash-Plume-May2010.pdf>.

ICAO. (1944). <http://www.icao.int/Pages/default.aspx>.

ICAO\_Annex2. (July 2005). *Rules of the Air* (Tenth Edition εκδ.). International Civil Aviation Organization.

ICAO\_Annex3. (2004). *Meteorological Service for International Air Navigation* (15th εκδ.). International Civil Aviation Organisation.

ICAO\_Doc4444. (2007). *Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM)* (15th ed.). International Civil Aviation Organization.

ICAO\_Doc9613. (2008). *Performance Based Navigation (PBN) Manual* (3rd εκδ.). International Civil Aviation Organization.

ICAO\_Doc9691. (2007). *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds* (Second Edition εκδ.). ICAO.

ICAO\_Doc9766. (2004). *Handbook on the International Airways Volcano Watch* (2nd ed.). International Civil Aviation Organization.

ICAO\_Doc9849. (2005). *Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual* (1st ed.). International Civil Aviation Organization.

ICAO\_Doc9859. (2009). *Safety Management Manual (SMM)* (Second edition 2009 εκδ.). Montréal, Quebec, Canada: ICAO 2009.

*Iceland on the web*. (n.d.). Ανάκτηση June 2012, από [http://iceland.vefur.is/iceland\\_nature/glaciers\\_in\\_iceland/eyjafjallajokull.htm](http://iceland.vefur.is/iceland_nature/glaciers_in_iceland/eyjafjallajokull.htm)

*Iceland volcano in maps*. (2010, April 20). Ανάκτηση June 2012, από BBC News: [http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk\\_news/8625813.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/8625813.stm)

*Iceland\_review*. (2010, 04 14). *Last Eyjafjallajökull Eruption Lasted Two Years*. Ανάκτηση June 2012, από Iceland Review ONLINE: [http://icelandreview.com/icelandreview/daily\\_news/?cat\\_id=16567&ew\\_0\\_a\\_id=360723](http://icelandreview.com/icelandreview/daily_news/?cat_id=16567&ew_0_a_id=360723)

Jelle Zeilinga de Boer, D. T. (2002). *Volcanoes in Human History*. New Jersey: Princeton University Press.

Jerzy Bartnicki, Ø. H. (2010). Eyjafjallajökull eruption - calculating the movement of ash. *meta vol.2* , σ. 9.

Jones, A. R., Thomson, D. J., Hort, M., & Devenish, B. (2007). The U.K. Met Office's next-generation atmospheric dispersion model NAME III. *27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application* (σσ. 580-589). Springer.

Josse, B. S.-H. (2004). global simulations with the multiscale CTM MOCAGE. *Tellus 56B* , 339-356.

Kalnay, E. K. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* , 437-472.

Langmann, B. V. (2008). Aerosol distribution over Europe: A model evaluation study with detailed aerosol microphysics. *Atmos. Chem. Phys.*8 , 1591-1607.

London\_MWO. (2010). *The Eyjafjallajökull eruption: A view from the Met Office*. Met Office.

Lynn Townsent White, J. (1978). *Medieval religion and technology: collected essays*. Los Angeles, California: University of California Press, Ltd.

Maral, G., & Bousquet, M. (2009). *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology* (5th ed.). Wiley.

Mike Burton, P. A. (2007). Magmatic Gas Composition Reveals the Source Depth of Slug-Driven Strombolian Explosive Activity. *Science* , 317 (5835), 227-230.

Millward, D. (2011). *telegraph.co.uk/travel/travelnews*. Ανάκτηση February 26, 2012, από <http://www.telegraph.co.uk/travel/travelnews/8940392/Ash-detection-technology-successfully-tested-by-easyJet.html>

Mylne, K. (2010). *Use of EPS for Volcanic Ash forecasting*. Met Office.

Newhall, C. a. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism:. *Journal of Geophysical Research (Ocean & Atmospheres)* , v. 87, p. 1231-1238.

Oppenheimer, C. (2003 June). Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia)1815. *Progress in Physical Geography* , 27 (2), 230-259.

Peter Sammonds, B. M. (2010). *Volcanic Hazard from Iceland*. London: University College London (UCL) Institute for risk and disaster reduction.

Piccard, D. L. (n.d.). *Encyclopædia Britannica*. Ανάκτηση Jan 16, 2012, από <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1424455/balloon-flight>

Pinel, V., Sigmundsson, F., & Sturkell, H. (2007). Discriminating volcano deformation due to magma movements and variable surface loads: application to Katla subglacial volcano, Iceland. *Geophysical Journal International vol.169* , 325–338.

Prata I.J, B. A. (1994). *Detection and Discrimination of Volcanic Ash Clouds by Infrared Radiometry—I:Theory*. U.S. Geological Survey Bulletin 2047.

Ryall, D. B., & Marion, R. H. (1998). Validation of the UK Met. Office's. *Atmos. Environ* , 4265–4276.

Searcy C, D. K. (1998). PUFF: a volcanic ash tracking and prediction model. *J Volcanol Geotherm Res* 80 , 1-16.

STATFOR\_Doc394. (2010). *Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic*. EUROCONTROL Statistics and Forecast Service.

Stohl, A. C. (2005). Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* 5 , 2461-2474.

Stohl, A. M. (1998). Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiments. *Atmos. Environ.* 32 , 4245-4264.

Webley, P. a. (2009). Improved prediction and tracking of volcanic ash clouds. *J. Volcanol.Geoth. Res.* 186 , 1-9.

Webley, P. W. (2009). Automated forecasting of volcanic ash dispersion utilizing virtual globes. *Journal Natural Hazards Publisher Springer Netherlands vol.51* , 345-361.

Wise, J. (1850). *A system of aeronautics, comprehending its earliest investigations, and modern practice and art*. Philadelphia: Joseph A. Speel.

Witham, C. S., & Hort, M. C. (2007). Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using 1 November 2004 Grimsvotn eruption. *Met. Applications*, (σσ. 17-38).

Zehner, C. (2010). Monitoring Volcanic Ash From Space. *Proceedings of the ESA-EUMETSAT workshop on the 14 April to 23 May 2010 eruption at the Eyjafjoll volcano, South Iceland*. (σ. 110). Frascati, Italy: ESA-Publication STM-280. doi:10.5270/atmch-10-01.

Δημητρολόπουλος, Π. (2010, Απρίλιος 24). Μας απειλούν έντεκα επικίνδυνα ηφαίστεια. *ΤΑ ΝΕΑ*.

Κυριακόπουλος, Κ. (2003). *Ηφαιστειολογία*. Αθήνα.

Παπανικολάου, Δ. Ι., & Σίδερης, Ι. Χ. (2008). *Γεωλογία η Επιστήμη της Γης*. ΑΘΗΝΑ.

Φωτάκος, Λ. (2010). *Ηφαιστειακός Κίνδυνος και Αεροναυτιλία*. Αθήνα.